

GUILHERME CUNHA DA SILVA

**“DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO E
PULSADO EM MATERIAIS DIELÉTRICOS: SIMILARIDADES E DIFERENÇAS.”**

Documento apresentado para obtenção do
grau de Doutor em Engenharia, Programa de
Pós-graduação em Engenharia, Universidade
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renê Robert

Co-orientador: Dr. Vitoldo Swinka Filho

CURITIBA

2005

AGRADECIMENTOS

Aos doutores Renê Robert e Vitoldo Swinka Filho pela dedicação e orientação segura durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng. Nilton Quiorin pela otimização do software para aquisição de dados.

Ao técnico Robson Cardoso dos Santos pela confecção dos porta-amostras e eletrodos de alta tensão.

À técnica Karla Hartmann pelas medidas de microscopia eletrônica de varredura e análise de energia dispersiva.

Aos estagiários Elaine e Carlos pelo auxílio na confecção das placas de polietileno.

Aos colegas Edemir Kowalski, Fernando Piazza, Marilda Munaro e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos Lourenço e Nina e a todos os amigos de longe que, durante o desenvolvimento deste trabalho, iluminaram meus pensamentos com suas palavras de sabedoria e conselhos fraternos.

Em especial a minha amada esposa Adalniza e minha filha Maryah pelo carinho, compreensão e dedicação presentes no dia-a-dia e, principalmente, pelos diversos finais de semana sacrificados durante a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. VISÃO GERAL.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	4
1.3. APRESENTAÇÃO.....	5
1.4. PUBLICAÇÕES.....	6
2. PRÍNCÍPIOS GERAIS.....	7
2.1. MATERIAIS ISOLANTES SÓLIDOS.....	7
2.1.1. EPÓXI.....	7
2.2.2. POLIETILENO.....	8
2.2. DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	9
2.3. CONDIÇÕES PARA OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS.....	12
2.4. DESCARGAS PARCIAIS EM TENSÃO ALTERNADA.....	17
2.5. DEGRADAÇÃO CAUSADA POR DESCARGAS PARCIAIS.....	21
3. RAIOS-X.....	23
3.1. PRODUÇÃO DE RAIOS-X.....	23

3.2. INTENSIDADE E ENERGIA DOS RAIOS-X	26
3.3. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X.....	27
3.3.1. IONIZAÇÃO POR RAIOS-X.....	27
3.3.2. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO....	28
3.3.3. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X PULSADO.....	33
4. DETECÇÃO, MEDIDA E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS.....	35
4.1. DETECÇÃO.....	35
4.2. TÉCNICAS DE MEDIDA E ANÁLISE.....	37
4.2.1. MEDIDA DE DESCARGA PARCIAL COM RESOLUÇÃO TEMPORAL.....	37
4.2.2. MEDIDA DE DESCARGA PARCIAL COM RESOLUÇÃO EM ÂNGULO DE FASE.....	39
4.2.3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	44
5. EXPERIMENTAL.....	47
5.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	47
5.1.1. CONFECÇÃO DO PORTA-AMOSTRAS.....	47
5.1.2. PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS.....	48
5.1.3. FIXAÇÃO DOS MATERIAIS NO PORTA-AMOSTRAS.....	49
5.1.4. INSERÇÃO DOS ELETRODOS.....	50
5.2. ARRANJO EXPERIMENTAL.....	51
5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
5.3.1. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE INÍCIO E EXTINÇÃO.....	54
5.3.2. MEDIDAS DE DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO E PULSADO.....	55

5.3.3. INFLUÊNCIA DA ATENUAÇÃO DO FEIXE DE RAIOS-X	57
5.3.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE DE ENERGIA DISPERSIVA.....	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
6.1. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO.....	61
6.1.1. TENSÃO DE INÍCIO E EXTINÇÃO.....	61
6.1.2. DISTRIBUIÇÕES $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$	63
6.1.3. CARGA APARENTE TOTAL POR CICLO.....	77
6.1.4. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	83
6.2. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X PULSADO.....	106
6.2.1. DISTRIBUIÇÕES $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$	106
6.2.2. CARGA APARENTE TOTAL POR CICLO.....	121
6.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE DE ENERGIA DISPERSIVA.....	127
6.4. SIMILARIDADES E DIFERENÇAS.....	131
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	133
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Coeficiente de absorção de energia e densidade para o epóxi e o polietileno.

Tabela 6.1. Tensão de início e extinção para as amostras de epóxi e de polietileno.

Tabela 6.2. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para amostras de epóxi e de polietileno, raios-X contínuo.

Tabela 6.3. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para amostras de epóxi e de polietileno, raios-X pulsado.

Tabela 6.4. Análise de energia dispersiva nas amostras de epóxi novas e pós-descarga.

Tabela 6.5. Análise de energia dispersiva nas amostras de polietileno novas e pós-descarga.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Tipos de descargas parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna e (d) em arborescência elétrica.

Figura 2.2. Curva de Paschen.

Figura 2.3. Representação do início da ocorrência de uma descarga parcial.

Figura 2.4. Modelo a-b-c.

Figura 2.5. Ocorrência de descargas parciais sob tensão alternada.

Figura 3.1. Tubo de raios-X.

Figura 3.2. Espectro contínuo de raios-X.

Figura 3.3. Radiação de freamento com linhas características.

Figura 3.4. Efeito do aumento da corrente de filamento no espectro da radiação.

Figura 3.5. Efeito do aumento da diferença de potencial no espectro da radiação.

Figura 4.1. Circuito clássico para detecção de descargas parciais.

Figura 4.2. Forma de onda do pulso de descarga.

Figura 4.3. Distribuição $H_n(q, \phi)$ obtida através de uma amostra de epóxi com vazio esférico de 0,5 mm.

Figura 4.4. Distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ obtidas através de uma amostra de epóxi com vazio esférico de 0,5 mm.

Figura 4.5. Representação da média e desvio padrão na distribuição $H_n(\phi)$.

Figura 4.6. Representação da assimetria na distribuição $H_n(\phi)$.

Figura 4.7. Representação da moda na distribuição $H_n(q)$.

Figura 5.1. Representação esquemática do porta-amostra.

Figura 5.2. Representação em corte da amostra.

Figura 5.3. Esquema do arranjo experimental utilizado para as medidas de descargas parciais.

Figura 5.4. Ajuste de fase (ângulo de disparo) para as medidas com raios-X pulsado.

Figura 5.5. Arranjo experimental utilizado para as medidas com raios-X (a) contínuo e (b) pulsado.

Figura 5.6. Parâmetros utilizados para cálculo da carga aparente total por ciclo.

Figura 6.1. Tensão de início e extinção para as amostras de epóxi e de polietileno.

Figura 6.2. Amostra de epóxi, E3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (50 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.3. Amostra de epóxi, E4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.4. Amostra de epóxi, E5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.5. Amostra de epóxi, E6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.6. Amostra de epóxi, E7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.7. Amostra de epóxi, E8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.8. Amostra de epóxi, E9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.9. Amostra de polietileno, P3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.10. Amostra de polietileno, P4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.11. Amostra de polietileno, P5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.12. Amostra de polietileno, P6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.13. Amostra de polietileno, P7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 5 e 6 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.14. Amostra de polietileno, P8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 5 e 6 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.15. Amostra de polietileno, P9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 5 e 6 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.16. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para as amostras de epóxi e de polietileno.

Figura 6.17. Carga aparente total por ciclo em função da intensidade dos raios-X, tensão aplicada de 9 e 10 kV, para amostras de epóxi.

Figura 6.18. Carga aparente total por ciclo em função da intensidade dos raios-X, tensão aplicada de 9 e 10 kV, para amostras de polietileno.

Figura 6.19. Epóxi - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio, para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 9 kV.

Figura 6.20. Epóxi - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio, para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 10 kV.

Figura 6.21. Polietileno - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio, para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 6 kV.

Figura 6.22. Polietileno - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio, para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 7 kV.

Figura 6.23. Epóxi - média em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 9 e 10 kV.

Figura 6.24. Polietileno - média em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 6 e 7 kV.

Figura 6.25. Epóxi - assimetria em função do diâmetro dos vazios para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 9 e 10 kV.

Figura 6.26. Polietileno - assimetria em função do diâmetro dos vazios para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 6 e 7 kV.

Figura 6.27. Epóxi - assimetria em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 9 e 10 kV.

Figura 6.28. Polietileno - assimetria em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 6 e 7 kV.

Figura 6.29. Investigação do fenômeno de supressão das descargas no polietileno: medida 1 – vazio virgem, medida 2 – 48 h, medida 3 – após medida 2, medida 4 – 24h.

Figura 6.30. Amostra de epóxi, E3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (50 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.31. Amostra de epóxi, E4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.32. Amostra de epóxi, E5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 11 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.33. Amostra de epóxi, E6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.34. Amostra de epóxi, E7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.35. Amostra de epóxi, E8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.36. Amostra de epóxi, E9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.37. Amostra de polietileno, P3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 2 mA e 4 mA).

Figura 6.38. Amostra de polietileno, P4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.39. Amostra de polietileno, P5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.40. Amostra de polietileno, P6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.41. Amostra de polietileno, P7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.42. Amostra de polietileno, P8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA, 2 mA e 4 mA).

Figura 6.43. Amostra de polietileno, P9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –1 mA).

Figura 6.44. Pico da carga aparente para amostras de epóxi e de polietileno, raios-X pulsado.

Figura 6.45. Amostras de epóxi - carga aparente total por ciclo em função do diâmetro do vazio, intensidade de raios-X e ângulo de disparo.

Figura 6.46. Amostras de polietileno - carga aparente total por ciclo em função do diâmetro do vazio, intensidade de raios-X e ângulo de disparo.

Figura 6.47. Amostra de epóxi nova, sem ocorrência prévia de descargas parciais.

Figura 6.48. Amostra de epóxi após a realização do teste de descargas parciais estimuladas com raios-X.

Figura 6.49. Amostra de polietileno nova, sem ocorrência prévia de descargas parciais.

Figura 6.50. Amostra de polietileno após a realização do teste de descargas parciais estimuladas com raios-X.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

a – amostra

A – amplificador

E_a – campo elétrico aplicado no dielétrico

E_e – campo de extinção das descargas parciais

E_i – campo de início de ocorrência das descargas parciais

E_l – campo elétrico local

E_m – campo elétrico médio no dielétrico

$H_n(q, \phi)$ – distribuição de ocorrências em função da carga aparente e ângulo de fase

$H_n(q)$ – distribuição de ocorrências em função da carga aparente

$H_n(\phi)$ – distribuição de ocorrências em função do ângulo de fase

K – capacitor de acoplamento

n – número de ocorrências de descargas parciais

V_a – tensão aplicada sob a amostra

V_c – tensão aplicada sob o vazio

V_e – tensão de extinção das descargas

V_i – tensão de início de ocorrência das descargas

V_r – tensão de ruptura, determinada pela curva de Paschen

ΔV - sobretensão

Z – impedância de medição

ϵ_r –permissividade elétrica relativa do dielétrico

τ_a – tempo estatístico de atraso

LDPE – polietileno de baixa densidade

HDPE – polietileno de alta densidade

XLPE – polietileno entrecruzado

NBR – Norma Brasileira Registrada

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

TEI – Transactions on Electrical Insulation

TDEI – Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation

CEIDP – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena

ICSD – International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics

EIM – Electrical Insulation Magazine

ICPADM – International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials

ICDMMA – International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications

ISH – International Symposium on High Voltage Engineering

RESUMO

O comportamento das descargas parciais em vazios presentes no interior de materiais dielétricos, quando estimuladas com raios-X contínuo e pulsado, é investigado. Para tal fim, amostras de epóxi e polietileno, com vazios gerados artificialmente, foram preparadas. O arranjo experimental utilizado permite aplicação simultânea de campo elétrico e raios-X nas amostras. Diferentes valores de tensão aplicada, assim como de intensidade de raios-X, foram utilizados durante os testes. A técnica de medida de descargas parciais com resolução em ângulo de fase foi utilizada para coleta e análise dos dados através de distribuições estatísticas. Parâmetros quantitativos das distribuições de amplitude e fase, tais como carga aparente total por ciclo, média, desvio padrão e assimetria foram calculados. Similaridades e diferenças entre estas duas formas de irradiação são discutidas, mostrando a potencialidade desta técnica como uma ferramenta para diagnóstico de materiais dielétricos. Ainda, um comparativo entre os diferentes materiais testados foi estabelecido.

Palavras-chave: descargas parciais, raios-X, epóxi, polietileno

ABSTRACT

The partial discharge behavior in voids when stimulated by continuous and pulsed x-ray is investigated. For this work epoxy and polyethylene samples with artificially generated voids were prepared. The experimental setup used allows simultaneous application of electric field and x-ray in the samples. Different values of applied voltage and x-ray intensity were used during the tests. The measurement technique of phase resolved partial discharge was used to data acquisition and analysis through statistical distributions. Quantitative parameters of distributions such as total apparent charge per cycle, mean value, standard deviation and skewness were calculated. Similarities and differences between these two irradiation modes are exposed, showing the potentiality of this technique as a tool for dielectric materials diagnostics. Furthermore, a comparative between the different materials was established.

Keywords: partial discharge, x-ray, epoxy, polyethylene

1. INTRODUÇÃO

1.1. VISÃO GERAL

A isolação elétrica é uma das mais importantes partes dos componentes de alta tensão e sua qualidade determina a confiabilidade dos diversos equipamentos elétricos utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, tais como cabos, capacitores, isoladores, transformadores, geradores e motores. Todo sistema de isolação elétrica é projetado para suportar diversos estresses, aos quais fica submetido durante sua vida. Estes estresses são normalmente classificados em quatro tipos, a saber: elétrico (tensão, frequência de operação e sobretensões), térmico (temperatura de operação e gradientes de temperatura), mecânico (vibração e torção) e ambiental (contaminação, corrosão), e podem agir sobre o sistema de isolação de forma individual ou combinada [FRUTH, 1992, STONE, 1993, GJAERDE, 1997].

Materiais poliméricos sintéticos, entre os quais o epóxi e o polietileno, são amplamente utilizados na manufatura de sistemas de isolação devido a suas excelentes propriedades dielétricas, entre as quais se destaca a sua elevada rigidez dielétrica. Todavia, deve ser observado que, por mais cuidadoso que seja o controle de qualidade durante o processo de manufatura é praticamente impossível evitar a presença de defeitos, tais como vazios, no produto final [BOGGS, 1990, MORSHUIS, 1995].

Vazios são fontes geradoras de descargas elétricas parciais internas. A ocorrência contínua destas descargas, quando sob estresse elétrico, leva a progressiva

deterioração das propriedades físicas dos materiais isolantes podendo vir, em última instância, a causar a falha do equipamento por ruptura dielétrica [DISSADO, 1992, MASON, 1995, GUTFLEISCH, 1995]. A medida de descargas parciais é o método mais comum e usual para detecção de vazios presentes na isolação elétrica [BOGGS, 1990]. Esta tem sido amplamente utilizada em testes de tipo e rotina para avaliação da qualidade de materiais [NBR 6940, IEC 270, 1981], reconhecimento de defeitos geradores de descargas parciais [GULSKI, 1992 e 1995a, KREUGER, 1993, KRIVDA, 1995a], monitoramento em linha da evolução das descargas parciais em equipamentos elétricos [FUHR, 1993, STONE, 1995, AHMED, 1998] e estudo dos mecanismos envolvidos na ocorrência de descargas parciais [MORSHUIS, 1993 e 1995]. Duas técnicas têm sido bastante utilizadas para medida e avaliação, qualitativa e quantitativa, de descargas parciais: medidas com resolução temporal [MORSHUIS, 1993 e 1995, BROSCHE, 1999] e medidas com resolução em ângulo de fase [GULSKI, 1995a, KRIVDA, 1995a].

Para a ocorrência de descargas parciais internas duas condições devem ser satisfeitas, a saber, (i) o campo elétrico no interior do vazio deve ultrapassar um valor crítico de ruptura e (ii) deve existir pelo menos um elétron livre disponível para dar início ao processo de avalanche [BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992, GUTFLEISCH, 1995, MORSHUIS, 1993 e 1995]. As medidas de descargas parciais normalmente são realizadas aplicando-se um campo elétrico bastante elevado na amostra sob ensaio, durante um tempo muito curto, geralmente 1 minuto, a fim de forçar a ocorrência das descargas parciais. Este procedimento, entretanto, tem alguns inconvenientes. A aplicação de um campo elétrico muito elevado ao sistema de isolação pode

comprometer a vida útil do equipamento. Além disto, o tempo de aplicação da tensão pode não ser suficiente para que a descarga seja ativada [FUJIMOTO, 1992]. Através de estudos sobre os efeitos da utilização simultânea de aplicação de tensão e irradiação com raios-X durante as medidas de descargas parciais uma técnica conhecida como Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X foi desenvolvida [RIZZETTO, 1987]. O estímulo de descargas parciais com raios-X permite que as medidas sejam realizadas com menor campo aplicado e com maior sensibilidade, possibilitando ainda a localização dos sítios de ocorrência [RIZZETTO, 1987, BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992]. Esta técnica tem sido utilizada para diagnóstico de espaçadores empregados em sistemas de isolamento a gás [BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992], em buchas de resina epóxi [PRITCHARD, 1996] e, mais recentemente, em sistemas de isolamento de papel impregnado com óleo e transformadores de potencial [LIN, 1999, HUANG, 2000]. Apesar de estabelecida a potencialidade desta técnica como ferramenta de diagnóstico de sistemas de isolamento, os mecanismos envolvidos na ocorrência das descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo ainda são pouco conhecidos [FUJIMOTO, 1992]. Mais recentemente, uma técnica alternativa, a qual utiliza irradiação da isolamento com raios-X pulsado, foi desenvolvida para detecção e construção de imagens digitais de defeitos presentes em amostras de epóxi e apresentada como uma promissora ferramenta para diagnóstico de defeitos em sistemas de isolamento [SWINKA-FILHO, 2002].

1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

Dois fatores principais motivaram o desenvolvimento do presente estudo. Do ponto de vista de engenharia a técnica de Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X, tanto contínuo quanto pulsado, apresenta-se como uma promissora ferramenta de diagnóstico e localização de defeitos em sistemas de isolamento. Além disto, a técnica representa um vasto campo a ser explorado. Entre os itens a serem explorados há a necessidade de um estudo mais amplo no que diz respeito à indução de descargas parciais com raios-X pulsado. Vale ressaltar que a grande maioria dos trabalhos realizados até o presente momento concentram-se em dois segmentos, a saber, estudos comparativos entre o comportamento das descargas parciais quando não-irradiadas e irradiadas com raios-X contínuo e utilização dos efeitos da irradiação com raios-X pulsado para a construção de imagens de defeitos induzidos artificialmente. Não há relato na literatura de estudo comparativo e análise de ambos os tipos de irradiação de raios-X, contínuo e pulsado. Neste sentido, o trabalho como um todo é inédito.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento das descargas parciais quando estimuladas com raios-X contínuo e pulsado, estabelecendo as similaridades e diferenças do efeito destes dois tipos de aplicação de raios-X em materiais dielétricos. Para tal fim será utilizada a técnica de medida e análise de descargas parciais com resolução em ângulo de fase. Deste modo, pretende-se preencher uma pequena parte da lacuna deixada pelos estudos anteriores na área de

descargas parciais estimuladas por raios-X. Além disto, um comparativo entre os diferentes materiais testados será estabelecido.

1.3. APRESENTAÇÃO

O presente trabalho é composto de 8 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma visão geral dos tópicos que serão abordados, a motivação e objetivo do trabalho, assim como as publicações geradas durante o decorrer do mesmo, referente a descargas parciais e envelhecimento e degradação de materiais isolantes empregados em equipamentos elétricos. No capítulo 2 são apresentadas as principais características dos materiais testados – epóxi e polietileno – bem como os princípios gerais sobre descargas parciais, incluindo definição e classificação, condições necessárias para ocorrência e comportamento sob estresse elétrico, particularmente tensão alternada, dando sempre ênfase ao objeto de estudo deste trabalho que são as descargas parciais internas. O capítulo 3 aborda conceitos gerais sobre a produção de raios-X e uma sucinta revisão sobre descargas parciais estimuladas por raios-X. Princípios de detecção e técnicas de medida e análise de descargas parciais são vistos no capítulo 4. No capítulo 5 é apresentada a descrição da etapa experimental: preparação das amostras, arranjo experimental e procedimento adotado. O capítulo 6 traz a apresentação dos resultados e discussão. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros. O capítulo 8 mostra a lista das referências utilizadas.

1.4. PUBLICAÇÕES

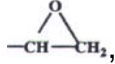
1. Silva, G.C; Swinka-Filho, V.; Robert, R. “Study of Continuous and Pulsed X-ray Induced Partial Discharge Statistical Behaviour in Epoxy Samples”. 7th ICPADM, Nagoya-Japan, June 1-5, 2003.
2. Silva, G.C. et al. “Melhoria dos materiais utilizados nas redes de energia elétrica: controle de qualidade e logística reversa”. 2º Citenel, Bahia, 2003.
3. Silva, G.C. et al. “Rede protegida piloto de Cuiabá – Avaliação de Equipamentos e Materiais”. 2º Citenel, Bahia, 2003.
4. Silva, G.C. et al. “Avaliação da Geometria dos Acessórios de Redes Protegidas de Distribuição Considerando Solicitações devido ao Campo Elétrico e Ambientais”. XV SENDI, Bahia, novembro 2002.
5. Silva, G. C. et al. “Avaliação de cabos isolados em polietileno usados em redes subterrâneas”. Eletricidade Moderna, 156, março 2002.
6. Silva, G.C. et al. “Uma estimativa do perfil de degradação da isolação em XLPE de cabos de potência utilizados na rede subterrânea da CEB”, 1º Citenel, Brasília, 2001.
7. Silva, G.C.; Leguenza, E.L.; Tomioka, J. “Comportamento Dielétrico e Mecânico do Polietileno Utilizado em Cabos Subterrâneos”, 1º Citenel, Brasília, 2001.

2. PRINCÍPIOS GERAIS

2.1. MATERIAIS ISOLANTES SÓLIDOS

Diversos materiais isolantes sólidos são empregados na isolação de equipamentos elétricos utilizados nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, entre os quais podem ser destacados o epóxi e o polietileno.

2.1.1. EPÓXI

As resinas epóxi se caracterizam pela presença dos grupos epóxi, , nas extremidades da cadeia. A transformação das resinas epóxi de um líquido viscoso para um material sólido termofixo, i.e., um material que uma vez produzido não retorna a condição de fluido, é efetuada através de um processo chamado de cura. Esta cura é normalmente efetuada pela adição de um composto, denominado de endurecedor, que contém múltiplos grupos reativos, os quais são capazes de reagir com os grupos epóxi. Agentes endurecedores comumente empregados incluem aminas, poliamidas e anidridos. As aminas e as poliamidas, pela sua alta reatividade com os grupos epóxi, são utilizadas em formulações onde a reação de cura é efetuada em temperatura ambiente. As poliamidas são utilizadas em formulações mais flexíveis, ao passo que as aminas fornecem materiais mais rígidos. Em formulações que utilizam anidridos como endurecedores, a reação de cura deve ser efetuada sob temperaturas elevadas e com

a adição de agentes aceleradores da reação. De uma forma geral, o epóxi após a cura apresenta as seguintes propriedades: excelente resistência química, alta resistência mecânica, estabilidade dimensional e excelentes propriedades elétricas isolantes. Devido a estas características o epóxi é amplamente utilizado como sistema de isolamento em transformadores a seco; na impregnação de bobinas de motores, geradores e transformadores isolados a óleo e na moldagem de componentes elétricos como buchas e isoladores [FELDMAN, 1996].

2.1.2. POLIETILENO

O polietileno é um polímero membro de uma série de compostos químicos chamados poliolefinas. Sua produção ocorre via polimerização por adição do etileno para formar a estrutura básica $-(CH_2-CH_2)_n-$ [FELDMAN, 1996]. O polietileno é um material termoplástico, i.e., pode ser repetidamente amolecido por aquecimento e endurecido por resfriamento dentro de uma faixa característica de temperatura [HALL, 1989]. Dentre os diferentes tipos de polietileno termoplástico que podem ser produzidos duas formas são bastante comuns: o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno de alta densidade (HDPE). Existe ainda um tipo especial de polietileno, geralmente obtido por reticulação a partir do polietileno de baixa densidade, que é o polietileno entrecruzado (XLPE). O fato deste tipo de polietileno possuir uma estrutura entrecruzada transforma-o em um material termofixo [HALL, 1989]. O polietileno possui excelentes propriedades elétricas isolantes, entre as quais destaca-se sua elevada rigidez dielétrica. Esta característica, aliada a seu baixo custo e fácil processamento, faz

com que o polietileno seja amplamente empregado na isolação de cabos de potência e na manufatura de isoladores [HALL, 1989, FELDMAN, 1996].

Apesar de suas excelentes propriedades elétricas estes materiais poliméricos, empregados em sistemas de isolação, ficam sujeitos a ação de estresse elétrico, térmico, mecânico ou ambiental quando em operação. A ação individual ou conjunta destes estresses pode levar ao envelhecimento e degradação das propriedades isolantes do material e, em última instância, a falha do equipamento. Entre os mecanismos de degradação existentes está o fenômeno conhecido como descargas parciais [DISSADO, 1992, GJAERDE, 1997].

2.2. DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre numa região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa [KREUGER, 1989]. As descargas parciais podem ser classificadas em três categorias de acordo com a sua origem: descarga superficial, descarga corona e descarga interna [MASON, 1995]. Particular atenção será dispensada na descrição das descargas parciais internas, as quais são os objetos de estudo deste trabalho.

Descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo do eletrodo para a superfície. Quando a

componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede um certo valor crítico o processo de descarga superficial é iniciado [GULSKI, 1995a]. Descargas superficiais ocasionam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Este fenômeno, conhecido como trilhamento, pode levar à ruptura completa da isolação [MASON, 1995]. Este tipo de descarga normalmente ocorre em cabos protegidos e terminações de cabos isolados, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barras de geradores [KREUGER, 1989].

Descargas corona ocorrem em gases a partir de pontas agudas em eletrodos metálicos. Estes pontos concentradores de estresse, ou seja, partes com pequenos raios de curvatura, formam regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem a ocorrência de descargas parciais [KREUGER, 1989]. Descargas corona no ar geram ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolação polimérica. Óxidos de nitrogênio combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação promovendo o trilhamento do material [MASON, 1995].

Descargas internas ocorrem em inclusões de baixa rigidez dielétrica, geralmente vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolação de alta tensão [KREUGER, 1989]. A formação de vazios na estrutura de materiais poliméricos pode ser devida a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. No caso de materiais termoplásticos

como, por exemplo, o polietileno, a falha pode ocorrer durante o processo de injeção do polímero devido à infiltração do ar atmosférico. Para polímeros termofixos, tais como as resinas epóxi, a formação dos vazios pode ocorrer durante o processo de cura do material, podendo ser devido à infiltração do ar atmosférico ou a formação de gases residuais provenientes de reações químicas [BOGGS, 1990]. Além dos fatores relativos ao processo de fabricação, os diversos estresses a que a isolamento é submetida ao longo de sua vida também podem causar o aparecimento de vazios [GJAERDE, 1997]. Descargas internas podem ocorrer numa região do material dielétrico onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um dos eletrodos [KREUGER, 1989]. Um tipo particular de descargas internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior da isolamento de equipamentos elétricos, tais como cabos de potência isolados, tendo sua origem devido à ocorrência contínua de descargas parciais internas em vazios ou a partir de uma falha no eletrodo [KREUGER, 1989, DISSADO, 1992]. A figura 2.1 apresenta de forma ilustrativa as três categorias de descargas parciais – superficial, corona e interna – que podem ocorrer em sistemas de isolamento. A partir do presente parágrafo o termo descarga parcial será sempre utilizado para designar descarga parcial interna.

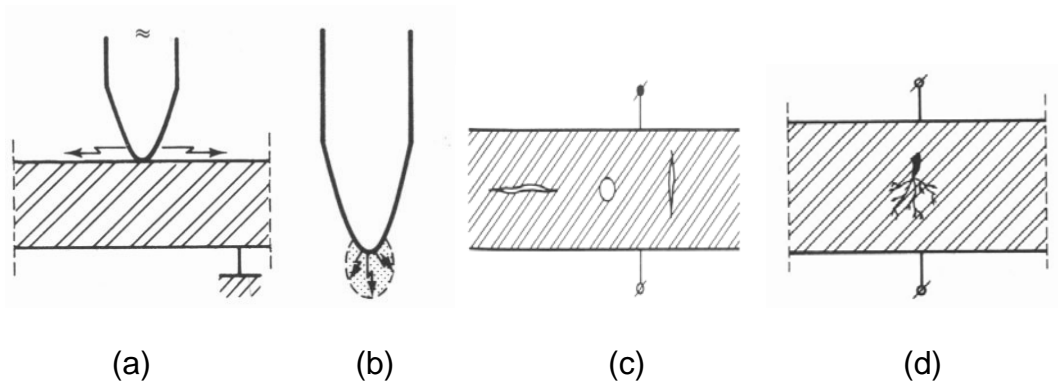


Figura 2.1. Tipos de descarga parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna e (d) em arborescência elétrica [KREUGER, 1989].

2.3. CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS

Para uma descarga parcial ocorrer em um vazio preenchido com gás duas condições devem ser satisfeitas. Uma condição necessária, mas não suficiente, é que o campo elétrico no interior do vazio, i.e. o campo elétrico local (E_l), deve ser igual ou superior a um campo mínimo de ruptura (E_r), determinando assim o campo de início de ocorrência das descargas (E_i) [BOGGS, 1990, FUJIMOTO, 1992, MORSHUIS, 1993 e 1995]. Além disto, deve existir um campo residual ou campo de extinção (E_e), abaixo do qual a atividade da descarga cessa [NIEMEYER, 1991].

Os valores de E_i e E_e dependem de diversos fatores, entre os quais estão as propriedades do gás (temperatura e, principalmente, pressão), a forma e o tamanho do vazio e o mecanismo específico de descarga [NIEMEYER, 1991, FUJIMOTO, 1992,

DISSADO, 1992, MORSHUIS, 1993 e 1995]. Se o valor de E_i puder ser relacionado com a tensão aplicada, levando em conta a geometria e localização do vazio, assim como a presença de cargas superficiais, a tensão de início da ocorrência de descargas, V_i , pode ser estimada [CRICHTON, 1989, BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992]. Da mesma forma que para E_i , um valor de tensão, denominado tensão de extinção (V_e), pode ser relacionado ao campo E_e .

Devido a analogia frequentemente estabelecida entre a ocorrência de descargas parciais em vazios circundados por dielétrico e a ocorrência de descargas entre eletrodos metálicos, os valores de E_r e, conseqüentemente, de tensão de ruptura V_r descritos pela curva de Paschen são empregados com freqüência em estudos de descargas em vazios [MASON, 1995, MORSHUIS, 1995]. Uma típica curva de Paschen para o ar é mostrada na figura 2.2.

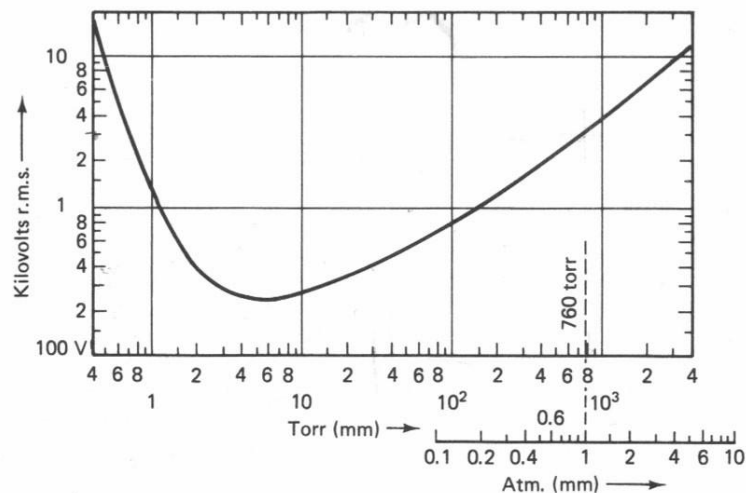


Figura 2.2. Curva de Paschen para o ar [KREUGER, 1989].

Vale ainda ressaltar que o valor de V_i não necessariamente é igual ao valor de V_r devido à existência de um tempo de atraso, τ_a , para a ocorrência da primeira descarga. A diferença entre V_i e V_r é denominada sobretensão (ΔV) [DEVINS, 1984, BOGGS, 1990, MORSHUIS, 1993]. A figura 2.3 ilustra o início da ocorrência de uma descarga parcial.

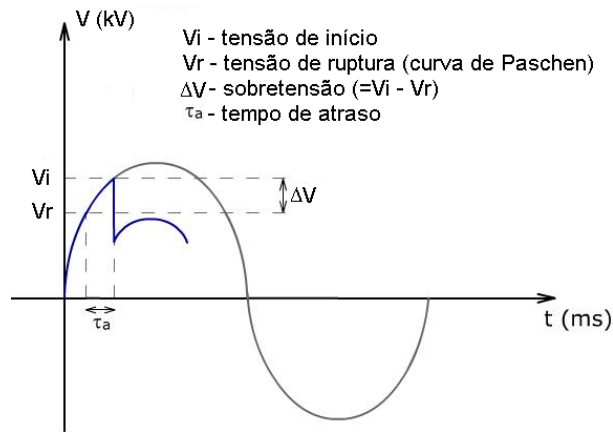


Figura 2.3. Representação do início da ocorrência de uma descarga parcial.

O campo elétrico local, E_l , pode ser determinado em função do campo elétrico macroscópico médio no restante do material dielétrico ou do campo aplicado, E_a , desde que o vazio possua uma geometria simples, o material seja considerado homogêneo e não haja presença de cargas superficiais e espaciais no interior do vazio. Para um vazio plano $E_l = \varepsilon_r \cdot E_a$ e para um vazio esferoidal $E_l = \frac{3 \cdot \varepsilon_r}{1 + 2 \cdot \varepsilon_r} \cdot E_a$, onde ε_r é a permissividade

elétrica relativa do material dielétrico. Os valores de permissividade elétrica relativa para o polietileno e o epóxi são, respectivamente, 2,2 e 4,0 [KU, 1987]. O valor de E_a é proporcional à tensão aplicada, V_a [KREUGER, 1989, GUTFLEISCH, 1995].

Satisfeita a primeira condição, um elétron inicial tem de ser fornecido ao vazio para que ocorra a formação de uma avalanche eletrônica e, conseqüentemente, o processo de descarga seja iniciado. Os dois principais mecanismos de geração de elétrons iniciais são a fotoionização do gás no interior do vazio e a emissão de elétrons a partir da superfície interna do vazio.

A fotoionização consiste no processo de ionização das partículas de gás a partir da absorção de radiação proveniente de uma fonte externa [HOWATSON, 1970, NASSER, 1971]. No caso de descargas parciais em vazios, a fotoionização depende da interação da radiação cósmica ou radiação de fundo com o gás no interior do vazio ou com a própria superfície do vazio [GUTFLEISCH, 1995]. Pode ainda ser induzida através de outros tipos de radiação ionizante, tais como raios- γ , raios-X e raios-UV [NIEMEYER, 1991].

Quando um átomo absorve um fóton incidente (fotoabsorção), dois fenômenos podem ocorrer. No primeiro, denominado fotoexcitação, um elétron move-se de uma órbita com menor energia para uma órbita com maior energia. Ao retornar ao seu estado fundamental, o excesso de energia será emitido como um novo fóton. No segundo, denominado fotoionização, o fóton tem energia suficiente para ionizar um átomo e produzir um fotoelétron. É importante observar que a fotoionização pode também ocorrer como resultado da radiação emitida a partir do próprio gás quando

átomos excitados retornam ao seu estado fundamental ou ainda quando átomos ionizados combinam-se com íons negativos para formar moléculas neutras [HOWATSON, 1970, NASSER, 1971].

Em princípio, dois mecanismos de emissão são possíveis de ocorrer: emissão por campo e emissão por impacto de moléculas metaestáveis deixadas por descarga prévia. Antes da ocorrência da primeira descarga o número de elétrons localizados em armadilhas próximas ou na superfície do vazio é muito pequeno e a probabilidade de emissão por campo é muito baixa. Além disto, para que ocorra o processo de emissão por campo existe a necessidade de que um campo elétrico elevado seja aplicado no objeto sob teste [GUTFLEISCH, 1995]. Uma vez iniciada a atividade de descarga o número de elétrons disponíveis na superfície do vazio é elevado e esta probabilidade é aumentada devido ao processo de emissão por impacto [NIEMEYER, 1991].

O processo de geração de elétrons iniciais é um processo estocástico, sendo a principal causa do caráter aleatório da atividade das descargas parciais. Desta forma, existe um tempo estatístico de atraso (τ_a) até que a primeira descarga ocorra [NIEMEYER, 1991, DISSADO, 1992, MORSHUIS, 1993 e 1995]. O tempo de atraso depende do número de elétrons gerados por segundo e do campo aplicado. A taxa de geração de elétrons em um vazio de 1 mm³ em condição ambiente é aproximadamente 4x10⁻³ elétrons/segundo, resultando num tempo de atraso de aproximadamente 10 minutos [MORSHUIS, 1993]. Desta forma, durante um teste de descargas parciais na forma convencional, i.e., aplicação de um campo muito elevado durante um tempo muito curto (em média 1 minuto), o campo mínimo de ruptura pode facilmente ser

excedido sem a ocorrência de descargas parciais [BOGGS, 1990]. Além disto, a aplicação de um campo elevado pode vir a comprometer a vida útil do sistema de isolamento [FUJIMOTO, 1992]. Após a ocorrência da primeira descarga, as descargas consecutivas apresentarão tempos de atraso muito curtos, na ordem de milisegundos, sendo estes valores diversas ordens de magnitude maiores que o tempo de formação de uma avalanche [BOGGS, 1990, DISSADO, 1992, MORSHUIS, 1993 e 1995]. Sendo assim, a diferença entre a tensão de início e a tensão de ruptura, obtida a partir da curva de Paschen, denominada sobretensão é considerada o parâmetro mais importante no processo de descarga por estresse elétrico [DEVINS, 1984, MORSUIS, 1993].

2.4. DESCARGAS PARCIAIS EM TENSÃO ALTERNADA

Duas diferentes aproximações são utilizadas para descrição do comportamento das descargas parciais em vazios quando sob tensão alternada: o modelo de circuito equivalente e a aproximação por campo elétrico.

O primeiro modelo de circuito equivalente desenvolvido, denominado circuito **a-b-c**, é uma aproximação simplificada utilizada para facilitar a compreensão da ocorrência das descargas parciais sob tensão alternada [BARTNIKAS, 1979]. Um esquema ilustrativo deste modelo é apresentado na figura 2.4. Neste circuito **a** corresponde à capacitância do dielétrico em bom estado e **b** à capacitância do dielétrico em série com a capacitância do vazio **c**.

De acordo com o modelo **a-b-c**, quando a tensão sob o vazio, v_c , atinge a tensão de início, uma descarga ocorre no vazio. Após a extinção da descarga a tensão sobre o vazio recomeça a aumentar. Esta tensão é dada pela superposição do campo elétrico aplicado e do campo formado pelas cargas superficiais deixadas na parede do vazio após a última descarga. Quando a tensão sobre o vazio atinge novamente a tensão de ruptura uma nova descarga ocorre. Este efeito repete-se diversas vezes durante cada semiciclo da tensão alternada e, desta forma, grupos regulares de descargas recorrentes são encontrados [BARTNIKAS, 1979, KREUGER, 1989].

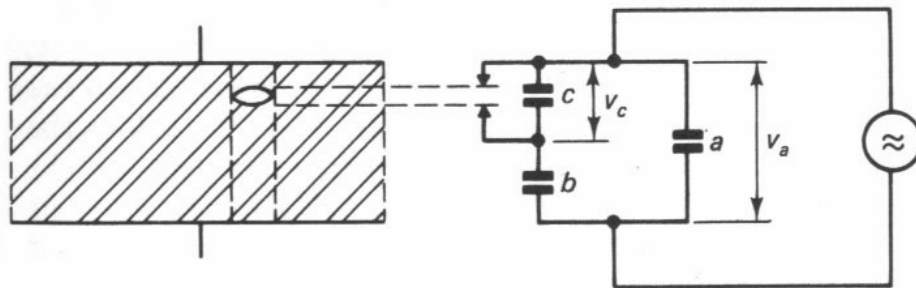


Figura 2.4. Modelo a-b-c.

O modelo **a-b-c** não leva em conta fatores como geometria, localização do vazio e presença de cargas espaciais. Desta forma, a simples operação de um circuito equivalente não necessariamente corresponde aos processos físicos que ocorrem em um sistema físico real [PEDERSEN, 1991, KELEN, 1995, McALLISTER, 1997]. Outros modelos têm sido propostos com base em circuitos com parâmetros distribuídos e na

utilização de softwares especiais de projeto e simulação [AGORIS, 1993, NIKOLAY, 1999, GAFVERT, 2003].

Um modelo qualitativo, fisicamente embasado na aproximação por campo elétrico, é encontrado em [BOGGS, 1990, EDIN, 2001] e ilustrado na figura 2.5, para descrição da ocorrência de descargas parciais em tensão alternada.

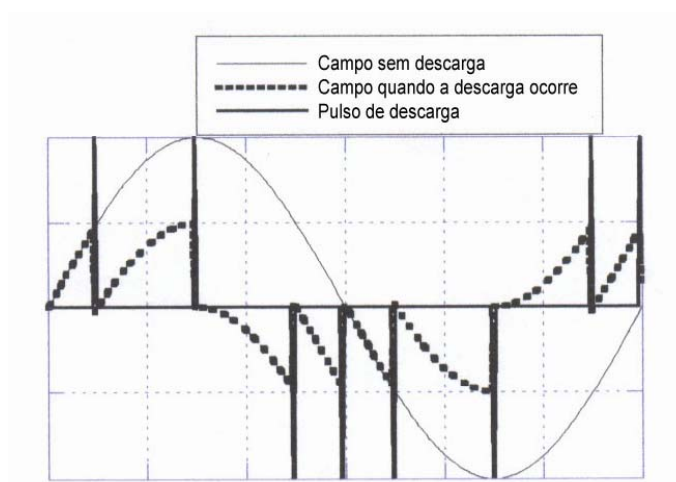


Figura 2.5. Ocorrência de descargas parciais sob tensão alternada.

Este modelo considera um vazio esférico circundado por um material dielétrico, onde uma tensão alternada é aplicada entre dois eletrodos metálicos. Inicialmente não há presença de cargas superficiais e espaciais. Além disto, antes da primeira descarga, o campo local é aproximadamente uniforme (i.e. aproximadamente igual em todos os pontos do vazio) e varia proporcionalmente à tensão aplicada. Satisfeitas as condições de ocorrência (ver item 2.2) a primeira descarga é disparada. As cargas liberadas pela primeira descarga são dirigidas pelo campo aplicado para as paredes do vazio, local no qual são depositadas. O campo local passa a ser a soma do campo devido à tensão

aplicada e do campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais. As descargas consecutivas seguem o campo total no interior do vazio e a descarga seguinte ocorrerá quando o campo de início for novamente atingido. Este processo faz com que as descargas ocorram mesmo no instante em que a tensão aplicada é zero, pois o campo local pode ser suficientemente elevado para alcançar o campo de início. O processo de descarga passa então a ser comandado pelo campo local e não mais pela tensão aplicada [BOGGS, 1990, EDIN, 2001].

Um amplo estudo dos mecanismos e processos físicos envolvidos na ocorrência de descargas parciais em vazios quando sob tensão alternada é encontrado em [MORSHUIS, 1993]. De acordo com este estudo, uma vez satisfeitas as condições necessárias para o início da ocorrência das descargas e tendo sido iniciado o processo de avalanche, uma quantidade significativa de carga espacial é construída no vazio. Dois processos competitivos passam a determinar a característica da descarga no vazio: (i) o processo de ionização do gás no vazio reforça o campo no interior do vazio através do acúmulo de carga espacial formada por íons positivos e (ii) a corrente de deslocamento que flui no circuito externo reduz o campo local. O processo dominante dependerá do valor da sobretensão aplicada, a qual é a diferença entre a tensão de início das descargas e a tensão mínima de ruptura determinada pela curva de Paschen.

Por analogia aos mecanismos de descarga estudados nos processos de descarga em gás entre eletrodos metálicos, os mecanismos de descarga parcial que ocorrem em vazios são denominados *Avalanche (Townsend)* e *Canal (Streamer)* [BARTNIKAS, 1993, MORSHUIS, 1993]. Para valores elevados de sobretensão (aproximadamente 5%) o processo de construção de carga espacial é rápido e o

mecanismo dominante é o tipo Canal; para valores pequenos de sobretensão (tipicamente 1%) o efeito da carga espacial é superado pelo da corrente de condução e o mecanismo dominante é o tipo Avalanche. Basicamente, a descarga tipo Avalanche consiste em uma avalanche auto-sustentada com sucessores iniciados no catodo e a descarga tipo Canal consiste de avalanches sucessivas, iniciadas no gás presente no interior do vazio por fótons de alta energia, geradas a partir da ionização do campo de carga espacial [MORSHUIS, 1993]. Um maior detalhamento dos mecanismos de descarga Avalanche e Canal está fora do escopo deste trabalho e pode ser encontrado em [BARTNIKAS, 1979, DEVINS, 1984, DISSADO, 1992]. Uma distinção importante entre as descargas do tipo Avalanche e Canal pode ser feita com relação a magnitude das descargas. Na descarga tipo Avalanche a magnitude da descarga aumenta linearmente com a sobretensão e independe da altura do vazio; na descarga tipo Canal a magnitude da descarga é praticamente insensível ao aumento da sobretensão e aumenta com o aumento do tamanho do vazio. Ainda, quando o vazio está submetido a estresse elétrico e ocorrência contínua de descargas parciais, os mecanismos de descarga tipo Avalanche e Canal podem ser relacionados com estágios de envelhecimento do material [MORSHUIS, 1993 e 1995].

2.5. DEGRADAÇÃO CAUSADA POR DESCARGAS PARCIAIS

Durante atividade contínua de descargas parciais em vazios, sob a ação de campo alternado elevado, dois efeitos deletérios podem ocorrer no material dielétrico: degradação por impacto de íons de nitrogênio e oxidação do polímero [MORSHUIS,

1995]. A degradação por impacto leva a formação de *pits* na superfície do dielétrico. Se o oxigênio estiver presente no interior do vazio, produtos altamente oxidativos (O , O_3 e O_2^-) são formados no processo de descarga. Devido a reações químicas na fase gasosa, hidrogênio, monóxido de carbono, metano e dióxido de carbono são produzidos [TANAKA, 1986]. Reações entre estes produtos e radicais poliméricos geram ácidos de natureza condutiva. Como resultado, o campo ao redor do vazio é reduzido e as descargas extintas [GAMEZ-GARCIA, 1987]. Vazios inicialmente preenchidos com ar são geralmente uniformemente oxidados, formando uma camada condutiva de alguns micrometros. Quando todo o oxigênio é consumido o bombardeamento por íons de nitrogênio leva a ocorrência de *pitting* e, posteriormente, à formação de arborescências [TANAKA, 1986, KIM, 2004]. A consequência destes efeitos é a redução do tempo estatístico de atraso e da tensão de início [MORSHUIS, 1993 e 1995, GUTFLEISCH, 1995].

Dentre os diversos materiais utilizados em sistemas de isolamento encontram-se o epóxi e o polietileno. Estes materiais apresentam comportamento distinto frente à ação do oxigênio e do ozônio. O polietileno possui uma resistência à degradação por oxigênio e ozônio muito menor do que o epóxi [CALLISTER, 1994].

3. RAIOS-X

Raios-X são ondas eletromagnéticas de alta energia. Dentro do espectro eletromagnético a região dos raios-X estende-se dos $2,4 \times 10^{16}$ Hz aos 5×10^{19} Hz, com comprimentos de onda extremamente reduzidos (entre 0,001 nm e 10 nm), quase sempre inferiores aos diâmetros atômicos [CULLITY, 1978].

3.1. PRODUÇÃO DE RAIOS-X

A forma mais comum de produção de raios-X consiste em acelerar um feixe de elétrons contra um alvo metálico. A figura 3.1 apresenta o dispositivo que realiza esta função, denominado tubo de raios-X.

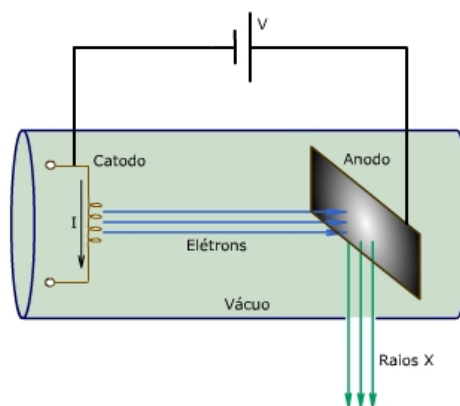


Figura 3.1. Tubo de raios-X.

Em um tubo de raios-X um filamento é aquecido pela circulação de uma corrente, produzindo um feixe de elétrons por emissão termiônica. Este feixe é então acelerado em direção a um elemento metálico pela aplicação de uma diferença de potencial entre o filamento e o metal. O filamento, chamado catodo, é geralmente constituído de tungstênio e o alvo metálico, chamado anodo, pode ser de tungstênio, molibdênio, ferro, cobre e outros. O choque do feixe de elétrons com o anodo produz dois tipos de raios-X. Um deles constitui o espectro contínuo e resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no anodo [CULLITY, 1978, TAUHATA, 1998]. Um espectro contínuo de raios-X é mostrado na figura 3.2.

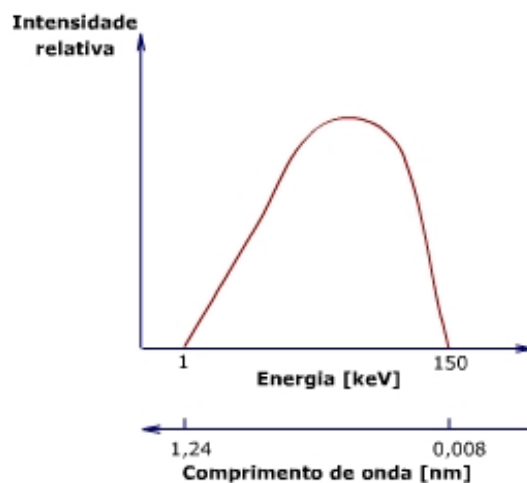


Figura 3.2. Espectro contínuo de raios-X.

O segundo tipo é o raio-X característico do material do anodo. Isto ocorre quando os elétrons do feixe ejetam elétrons das camadas internas do elemento que constitui o anodo. As vacâncias deixadas pelos elétrons ejetados são preenchidas por elétrons de

camadas superiores. Como consequência, picos característicos de raios-X são emitidos, com energia igual à diferença de energia entre as órbitas superiores e a órbita inferior. Cada pico característico possui um nome de acordo com a transição que lhe deu origem. Assim, a transição de elétrons da camada L para a camada K dá origem a picos característicos K_{α} . Transições da camada M para a camada K provocam linhas características K_{β} . Analogamente, transições para a camada L geram picos característicos L_{α} , L_{β} e outros [CULLITY, 1978, TAUHATA, 1998]. A figura 3.3 apresenta um exemplo de espectro com raios-X característicos K_{α} e K_{β} :

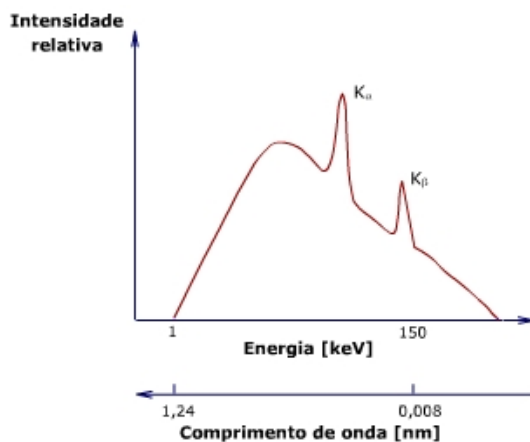


Figura 3.3. Radiação de freamento com linhas características.

Cada espectro de raios-X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do anodo.

3.2. INTENSIDADE E ENERGIA DOS RAIOS-X

Os principais parâmetros que devem ser observados na produção de raios-X são (i) a corrente do filamento e (ii) a diferença de potencial entre o catodo e o anodo.

A corrente do filamento está relacionada com a intensidade do feixe de raios-X emitido. Quanto maior a corrente circulando pelo filamento, maior o número de elétrons emitidos e maior a intensidade do feixe de raios-X. O formato do espectro da radiação não se altera com o aumento da corrente do filamento, conforme pode ser visto na figura 3.4.

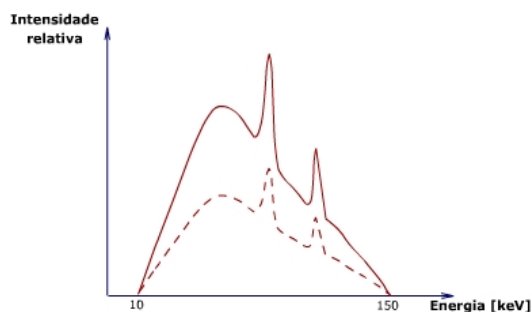


Figura 3.4. Efeito do aumento da corrente de filamento no espectro da radiação.

Por sua vez, a diferença de potencial entre o anodo e o catodo está relacionada com a energia dos elétrons acelerados. Quanto maior a diferença de potencial, maior a energia dos elétrons acelerados, resultando na produção de um número maior de fótons e em um aumento do número de linhas características e das energias máxima e média da radiação produzida. Ao contrário do que ocorre quando a corrente do filamento é

aumentada, um aumento da diferença de potencial entre o catodo e o anodo causa uma mudança no formato do espectro da radiação emitida. A figura 3.5 ilustra este efeito.

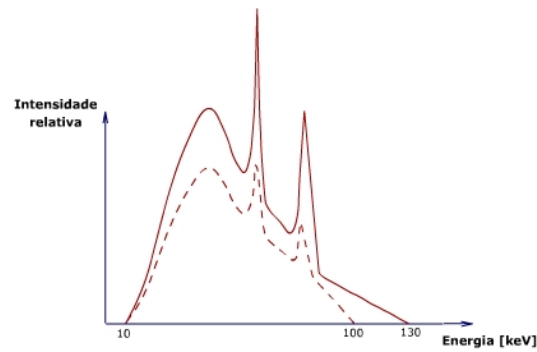


Figura 3.5. Efeito do aumento da diferença de potencial no espectro da radiação.

3.3. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X

3.3.1. IONIZAÇÃO POR RAIOS-X

Raios-X podem ser usados para ionizar gases devido a sua alta energia, que pode variar de 25 eV a 125 MeV [NASSER, 1971]. De uma forma geral a ionização por raios-X é semelhante a fotoionização, desde que, em ambos os casos a fotoabsorção leva à excitação ou ionização do átomo. Todavia, algumas diferenças devem ser destacadas. A primeira é que, quando um átomo do gás absorve um fóton de raios-X um elétron de valência fracamente ligado pode ser liberado usando parte da energia do fóton. A energia em excesso do fóton, que é geralmente muito alta, pode ser convertida em energia cinética para o elétron. Este elétron em alta velocidade pode ionizar mais

átomos via ionização por colisão. A segunda diferença é que um fóton de raios-X de alta energia pode arrancar um elétron de uma camada interna do átomo. A alta energia absorvida pode ser adequada para dar ao elétron um momento suficiente para deixar o átomo. No átomo ionizado, o elétron faltante é substituído por outro da camada seguinte e este processo é acompanhado pela emissão de outro fóton de raios-X, com energia menor que o fóton primário. Este novo fóton, por sua vez, pode ionizar outros átomos [NASSER, 1971].

3.3.1. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO

Medidas de descargas parciais estimuladas com raios-X foram realizadas inicialmente nos anos 60 por Mole [RIZZETTO, 1987]. A aplicação de raios-X na isolação, durante medidas de descargas parciais, aumenta a taxa de produção de elétrons no vazio e diminui o tempo estatístico de atraso. Como resultado deste efeito, descargas parciais sustentadas podem ser observadas com uma tensão aplicada bastante reduzida [BRAUN, 1991]. Nos anos 80, Baghurst [BAGHURST, 1985] observou que o efeito das descargas parciais estimuladas por raios-X pode também ser utilizado para a localização do sítio de descargas parciais em um sistema de isolação. Além disto, a sensibilidade do sistema de detecção é ampliada. Esta técnica de medida, a qual combina a utilização de tensão aplicada e irradiação com raios-X como fonte indutora de descargas, passou a ser denominada Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X. No final dos anos 80 e início dos anos 90 pesquisadores da *Ontario Hydro Technologies* realizaram amplo estudo com o objetivo de verificar a possibilidade de

aplicação desta técnica em testes de controle de qualidade de espaçadores de epóxi utilizados em sistemas isolados a gás [RIZZETTO, 1987, BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992]. Numa primeira etapa foi realizado um estudo preliminar com o objetivo de verificar o comportamento da tensão de início, assim como outras características das descargas parciais, em função do tamanho do vazio, campo elétrico aplicado e intensidade dos raios-X. Para este propósito foram utilizadas amostras de epóxi de 4 mm de espessura, cada qual contendo somente um único vazio esférico, com diâmetros variando de 0,2 mm a 2,0 mm. A tensão máxima aplicada foi de 60 kV, correspondente a um campo elétrico de 15 kV/mm. As amostras foram irradiadas com raios-X de 65 kV - 1,1 mA. Foram também realizadas medidas sem raios-X aplicado. Em todos os testes a tensão foi aplicada durante um tempo tão curto quanto possível a fim de minimizar o efeito do envelhecimento do material nos resultados [RIZZETTO, 1987]. De acordo com Rizzeto e colaboradores [RIZZETTO, 1987], com a irradiação com raios-X, a tensão de início das descargas é reduzida na faixa de 50 a 75% em relação à tensão de início sem irradiação com raios-X. Vazios muito pequenos, antes não detectados, foram ativados através de irradiação com raios-X de diferentes intensidades, permitindo assim a determinação da tensão de início das descargas. Medidas de tensão de início e de outras grandezas relacionadas às descargas parciais são muito mais precisas e apresentam maior repetibilidade quando as amostras são irradiadas com raios-X. Foi ainda observado que a taxa de repetição das descargas aumenta com a intensidade dos raios-X [RIZZETTO, 1987]. De posse destes resultados preliminares um sistema de medida de alta sensibilidade (0,01 pC), combinando aplicação simultânea de estresse elétrico e raios-X, foi construído para testar

espaçadores de epóxi empregados em sistemas isolados a gás [BRAUN, 1991]. Centenas de espaçadores, com defeitos gerados artificialmente foram testados através de medidas de descargas parciais estimuladas com raios-X e de medidas realizadas da forma convencional. Um comparativo foi estabelecido, entre o comportamento das amostras não-irradiadas e irradiadas com raios-X, através da análise de padrões de descarga. Os espaçadores foram irradiados com raios-X de 150 kV-1200 mA [BRAUN, 1991; FUJIMOTO, 1992]. Os principais resultados observados durante o estudo realizado com amostras de espaçadores de epóxi são abaixo sumarizados [BRAUN, 1991, FUJIMOTO, 1992]:

(i) com a aplicação de raios-X contínuo durante as medidas de descargas parciais ocorre um aumento na taxa de repetição dos pulsos (i.e., do número de contagens) e uma concentração dos pulsos de descargas parciais em torno de um valor mínimo;

(ii) quando sob irradiação com raios-X contínuo as amostras apresentaram um valor de tensão de início bastante reduzido em relação às amostras não-irradiadas. Foi observada redução da tensão de início de até 80%. Este efeito tem aplicação prática direta tendo em vista que a tensão aplicada durante o teste pode ser bastante reduzida e, conseqüentemente, a isolação submetida a um menor estresse;

(iii) a taxa de repetição das descargas parciais aumenta proporcionalmente com a intensidade do feixe de raios-X e a tensão aplicada, permitindo a modulação das descargas. Desta forma, as medidas tornam-se mais repetitivas e precisas, reduzindo o espalhamento estatístico inerente às medidas de descargas parciais realizadas da maneira convencional. Ainda, o direcionamento de um feixe colimado de raios-X na

amostra permite ativar os defeitos geradores de descargas de forma individual, obtendo-se uma forma de localização dos mesmos;

(iv) múltiplos vazios presentes na isolação podem ser facilmente identificados tendo em vista que a distribuição de amplitude de cada vazio é independente;

(v) tanto a forma do pulso quanto os padrões de distribuição das descargas parciais variam significativamente quando sob ação de raios-X sugerindo que, além do aumento da contagem dos pulsos, há ainda uma influência no mecanismo de descarga.

Pritchard e colaboradores [PRITCHARD, 1996] realizaram uma série de experimentos em buchas de resina epóxi para avaliar a confiabilidade da técnica de descargas parciais estimuladas por raios-X, obter uma melhor caracterização das descargas parciais em sistemas de isolação em epóxi e, ainda, determinar a potencialidade da técnica na localização de vazios internos. Para tanto foi utilizado um arranjo experimental constituído de um transformador de 50 kV e uma fonte de raios-X industrial de 150 kV-8mA. Foi mostrado que a utilização da técnica de descargas parciais estimuladas por raios-X é um método seguro, eficiente e confiável para a localização de vazios em sistemas de isolação em epóxi [PRITCHARD, 1996].

Mais recentemente, Lin e colaboradores [LIN, 1999, HUANG, 2000] têm aplicado a técnica de descargas parciais estimuladas com raios-X contínuo em óleos isolantes, sistemas de isolação papel/óleo e transformadores de potencial. O arranjo experimental adotado permite aplicação de tensão máxima de 100 kV. As amostras foram irradiadas com raios-X de 100-200 kV. Medidas de tensão de início e outras características das descargas quando irradiadas e não irradiadas com raios-X foram realizadas. Foram utilizadas como amostras placas de poli(metilmetacrilato) (PMMA) com vazios

individuais de 0.2 a 5 mm de diâmetro para estudos preliminares e, na seqüência, óleo de transformador e sistemas de isolamento papel/óleo. Amostras com múltiplos defeitos também foram testadas. Os resultados comparativos obtidos para amostras de PMMA irradiadas e não-irradiadas com raios-X contínuo mostraram que tanto para amostras com uma única cavidade quanto para amostras com múltiplas cavidades a tensão de início é reduzida e que quanto maior o diâmetro do vazio menor a tensão de início. Ainda, a freqüência e amplitude das descargas parciais aumentam com o aumento da intensidade dos raios-X. O comportamento da amostra com múltiplos defeitos corresponde a simples superposição do comportamento das amostras com um único defeito [LIN, 1999, HUANG, 2000]. Em amostras de óleo de transformador [LIN, 1999, HUANG, 2000] e papel impregnado com óleo [HUANG, 2000], 1.5 mm de espessura, também foram observados o aumento da taxa de repetição das descargas e a redução da tensão de início quando as amostras foram irradiadas com raios-X [LIN, 1999, HUANG, 2000]. Um arranjo contendo um transformador de potencial foi irradiado com raios-X. Os defeitos presentes na isolação foram localizados através da varredura do arranjo com raios-X. Foi sugerido o desenvolvimento de um sistema de alta precisão para localizar defeitos na isolação de transformadores [HUANG, 2000].

Finalmente, vale ressaltar as implicações práticas, tanto do ponto de vista de pesquisa quanto do ponto de vista de testes industriais, da utilização simultânea de tensão aplicada e irradiação com raios-X em medidas de descargas parciais. Do ponto de vista de pesquisa a utilização de raios-X é uma importante ferramenta para ampliar a compreensão dos mecanismos que envolvem o fenômeno de descargas parciais em vazios e para estudos de modo de falha em materiais opacos. Por outro lado, os testes

realizados em indústrias podem ser feitos com menor tensão aplicada, o que minimiza os riscos inerentes às medidas de alta tensão. Ainda, um melhor controle de qualidade na produção de equipamentos de alta tensão pode ser estabelecido, tendo em vista que defeitos não detectados através das medidas convencionais são detectados com a utilização desta técnica [FUJIMOTO, 1992].

3.3.2. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X PULSADO

Swinka-Filho [SWINKA-FILHO, 2000 e 2002] utilizou varredura com feixe de raios-X pulsado em amostras de epóxi de 2 mm de espessura com vazios esféricos de diferentes tamanhos para estimular a ocorrência de descargas parciais. Foi observado que a amplitude das distribuições de ocorrência como função do ângulo de fase é proporcional a intensidade do feixe de raios-X pulsado. Com base neste resultado imagens digitais dos vazios presentes nas amostras de epóxi foram construídas utilizando representações de superfícies tridimensionais e mapas de cores em forma de curvas de nível. Esta nova técnica de ensaio não-destrutivo é apresentada como uma promissora ferramenta para diagnóstico de defeitos em materiais poliméricos, pois permite obter informação sobre a localização e a dimensão dos defeitos e, adicionalmente, do nível de atividade de descarga em cada defeito [SWINKA-FILHO, 2000 e 2002]. Segundo Swinka-Filho [SWINKA-FILHO, 2000] estudos adicionais são necessários para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento das descargas parciais quando estimuladas por raios-X pulsado.

Durante o início deste trabalho Silva e colaboradores [SILVA, 2003] realizaram um estudo preliminar, no qual apresentaram os primeiros resultados referentes a medidas de descargas parciais estimuladas por raios-X, contínuo e pulsado, em amostras de epóxi com vazios gerados artificialmente. A extensão deste estudo preliminar será abordada nos capítulos posteriores.

4. DETECÇÃO, MEDIDA E ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS

4.1. DETECÇÃO

A ocorrência de uma descarga parcial dentro de um vazio causa uma rápida transferência de cargas entre as superfícies opostas do vazio, na direção do campo elétrico aplicado. Esta transferência de cargas implica em um novo arranjo das cargas na amostra como um todo e, como consequência, aparece um pulso de corrente no circuito externo do qual a amostra faz parte [GULSKI, 1995a]. Em geral, o pulso de corrente apresenta largura média na ordem de dezenas de nanosegundos (ns) e frente do pulso com tempos de subida na ordem de picosegundos (ps). Para detectar esses pulsos de descargas parciais são utilizados circuitos cuja configuração deve favorecer a propagação do pulso e otimizar sua detecção [MASON, 1995, MORSHUIS, 1995]. Um circuito clássico para detecção de descargas parciais é mostrado na figura 4.1.

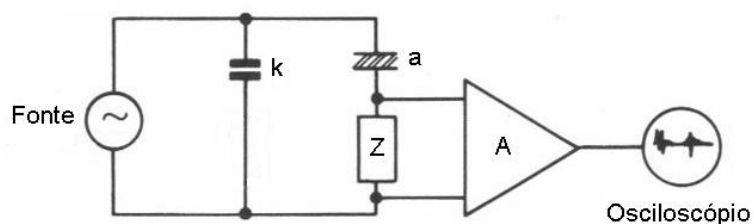


Figura 4.1 Circuito clássico para detecção de descargas parciais.

A fonte de tensão alternada fornece alimentação para o circuito. Em geral as fontes de alimentação de alta tensão utilizam transformadores elevadores de tensão, os quais apresentam alta impedância para pulsos de alta frequência. Para que o pulso de corrente devido à descarga parcial possa se propagar e ser detectado na impedância de medição Z , um capacitor de acoplamento k é colocado em paralelo com a capacitância a da amostra. Desta forma, o circuito série formado por k , a e Z será um caminho de baixa impedância para o pulso de descarga. O pulso desenvolvido na impedância de medição Z é amplificado pelo amplificador A , cuja escolha da banda de passagem depende da configuração da impedância de medição utilizada, podendo ser esta um resistor ou um circuito ressonante [KREUGER, 1989]. Uma variação do circuito de detecção apresentado consiste em colocar a impedância de medição em série com o capacitor de acoplamento. Ambos os circuitos, seja com a impedância de medição em paralelo ou em série, são eletricamente iguais: a mesma tensão ocorre ao redor da impedância Z , assumindo que a impedância da fonte de alta tensão seja grande [KREUGER, 1989, MASON, 1995].

Um resistor é utilizado como impedância de medição quando o objetivo consiste no registro da forma de onda do pulso e avaliação de parâmetros relacionados com o sinal detectado. Esta impedância de medição é utilizada em medidas de descargas parciais com resolução temporal [MORSHUIS, 1993 e 1995]. O circuito ressonante é utilizado quando se deseja obter padrões de descarga, onde a carga aparente transferida e o instante de sua ocorrência são registrados, sendo utilizado em medidas de descargas parciais com resolução em ângulo de fase [GULSKI, 1995 a].

4.2. TÉCNICAS DE MEDIDA E ANÁLISE

Duas técnicas têm sido amplamente utilizadas para medida e análise de descargas parciais: (i) medida de descargas parciais com resolução temporal e (ii) medida de padrões de descargas parciais com resolução em ângulo de fase. A fim de estabelecer um comparativo entre padrões de descargas parciais, quando estimuladas por raios-X contínuo e pulsado, fez-se uso neste trabalho da medida de padrões de descargas parciais com resolução em ângulo de fase.

4.2.1. MEDIDA DE DESCARGAS PARCIAIS COM RESOLUÇÃO TEMPORAL

A técnica de medida de descargas parciais com resolução temporal consiste em registrar a forma de onda do pulso de descarga em função do tempo para posterior análise. Para que os pulsos registrados sejam fiéis à evolução da descarga, a impedância de medição deve ser uma resistência, de forma que capacitâncias e indutâncias parasitas dos cabos que transportam o sinal sejam minimizadas. O amplificador utilizado deve ter banda de passagem superior ao espectro de frequências do pulso a ser medido para evitar a introdução de distorções no sinal analisado e o osciloscópio deve possuir limite de banda superior a 1GHz e taxa de amostragem superior a 2 GS/s [OSVATH, 1995, MORSHUIS, 1995]. A figura 4.2 apresenta a forma de onda do pulso de descarga para uma amostra nova de polietileno com vazio cilíndrico.

A medida de descargas parciais com resolução temporal tem sido utilizada para estudo dos mecanismos envolvidos na ocorrência de descargas parciais internas [MORSHUIS, 1993 e 1995, GAXIOLA, 1996] e modelamento da forma das descargas [CHENG, 2000]. Através da análise da evolução do pulso de descarga no tempo e da realização de estatísticas relacionadas com parâmetros do pulso, tais como amplitude do pico, área do pulso, tempo de subida/ descida e largura do pulso à meia altura é possível classificar os tipos de descargas e relacioná-las com o estágio de degradação do material [MORSHUIS, 1993 e 1995, KIM, 2002]. Novos métodos de análise, tais como Transformada de Fourier [KIM, 2002] e Transformada “*Wavelet*” [MASANORI, 1995, WU, 1995] têm sido utilizados para avaliação da forma do pulso.

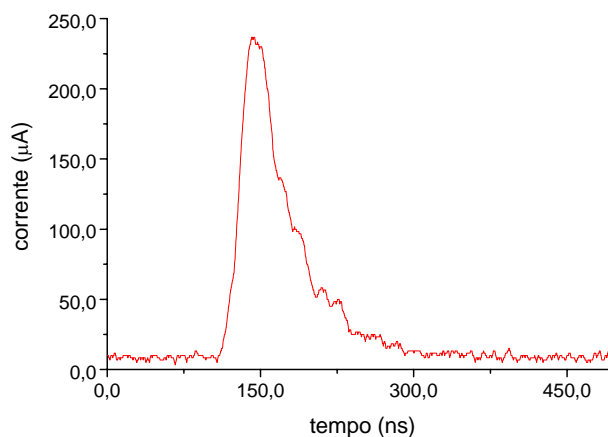


Figura 4.2. Forma de onda do pulso de descarga.

4.2.2. MEDIDA DE DESCARGAS PARCIAIS COM RESOLUÇÃO EM ÂNGULO DE FASE

Os primeiros padrões de descargas parciais foram observados através de osciloscópio, onde os pulsos de descarga são sobrepostos na onda senoidal da tensão aplicada e mostradas em uma base de tempo elíptica [KREUGER, 1989]. O desenvolvimento de técnicas digitais durante os anos 60 e 70 tornaram possível armazenar e digitalizar dados de medidas de descargas parciais com a ajuda de analisadores de multicanais. Com estas técnicas foi possível obter distribuições de altura do pulso das descargas. Desenvolvimentos adicionais durante os anos 80 permitiram a medida simultânea da altura do pulso e do ângulo de fase da ocorrência da descarga parcial [OKAMOTO, 1986, BARTNIKAS, 1987 e 2002], formando a base da técnica de medida de padrões de descargas parciais com resolução em ângulo de fase. Esta técnica consiste na medida e análise das distribuições estatísticas das ocorrências de descargas parciais em função da amplitude e do ângulo de fase de ocorrência das mesmas. Cada descarga parcial é registrada com sua amplitude e ângulo de fase em relação à tensão aplicada na amostra. Com o conjunto de dados acumulados durante o período de medição, o qual corresponde a um número inteiro de períodos da tensão aplicada, uma distribuição $H_n(q, \phi)$, também conhecida como padrão $n-q-\phi$, pode ser obtida. Esta distribuição fornece a relação entre o número de ocorrências (n), a magnitude (q) e o ângulo de fase (ϕ) de um evento de descarga parcial. Outras distribuições podem ser obtidas com os dados acumulados durante a

medida, a saber, distribuição da carga máxima em função do ângulo de fase $H_{q_{\max}}(\phi)$, distribuição da carga média em função do ângulo de fase $H_{q_{\text{med}}}(\phi)$, distribuição do número de ocorrências em função do ângulo de fase $H_n(\phi)$, distribuição do número de ocorrências em função da amplitude ou carga aparente $H_n(q)$ e distribuição do número de ocorrências em função da energia da descarga $H_n(p)$ [GULSKI, 1995 a e b, KRIVDA, 1995a]. A impedância de medição utilizada nesta técnica consiste basicamente de um circuito RLC.

A figura 4.3 apresenta um exemplo de um padrão de descarga parcial interna obtida através da aplicação simultânea de estresse elétrico e raios-X em uma amostra de epóxi com vazio esférico. Distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$, obtidas a partir da mesma amostra, estão ilustradas na figura 4.4. São estas as distribuições que serão utilizadas no decorrer deste trabalho para estudo do comportamento das descargas parciais estimuladas com raios-X contínuo e pulsado em amostras de epóxi e polietileno.

Algumas vantagens da utilização da técnica de medida de descargas parciais com resolução em ângulo de fase, frente à técnica de medida com resolução temporal, merecem destaque, a saber: a técnica permite a utilização de circuito de detecção convencional; não há diferença entre o caminho que a descarga parcial percorre no circuito e aquele visto pelo detector; o tipo de detector ou acoplamento utilizados não influencia o resultado, uma vez que a forma do pulso não é relevante e sim sua altura relativa e ângulo de fase [GULSKI, 1995b].

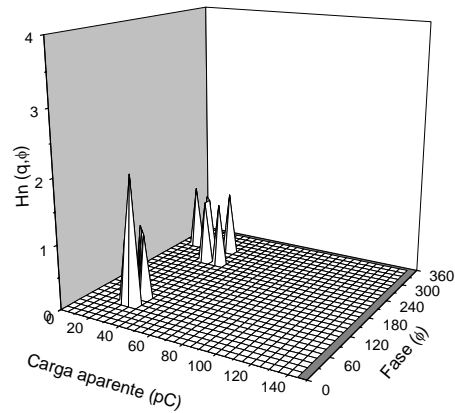


Figura 4.3. Distribuição $H_n(q, \phi)$ obtido através de uma amostra de epóxi com vazio esférico de 0,5 mm.

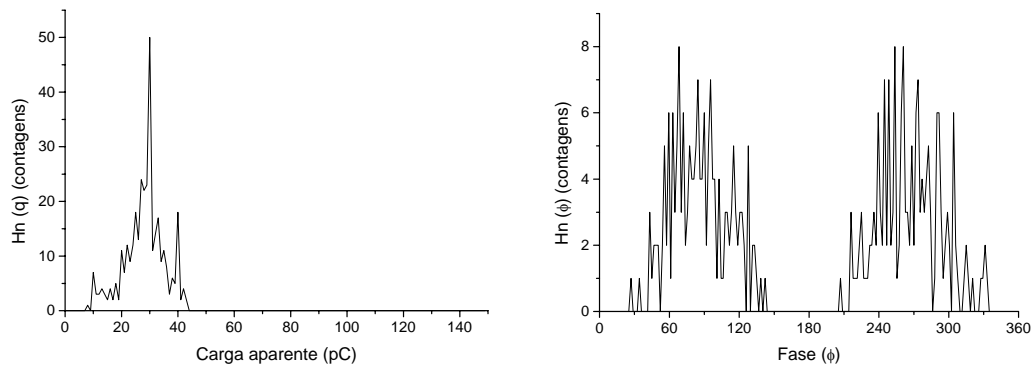


Figura 4.4. Distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ obtidas através de uma amostra de epóxi com vazio esférico de 0,5 mm.

As distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ têm sido aplicadas tanto para reconhecimento de defeitos geradores de descargas parciais e diagnóstico de envelhecimento de sistemas de isolamento [GULSKI, 1992, 1993, 1995 a, b e c, KREUGER, 1993, KRIVDA, 1995a e b, CHAMPION, 1995, HUDON, 1995, MONTANARI, 1995 e 2000, LALITHA, 1998 e 2000, BOZZO, 1995 e 1998, CONTIN, 1998 e 2000] quanto para monitoramento em linha da

evolução das descargas parciais em sistemas de isolação de grandes geradores [KIM, 1992, STONE, 1992 e 1995, WANG, 1998, ZHENYLAN, 1998, ZONDERVAN, 2000], transformadores [FUHR, 1993], sistemas isolados a gás [GULSKI, 1993, MEIJER, 1998] e cabos de potência [BORSI, 1992, AHMED, 1998].

Cada fonte de descargas parciais, com sua geometria, localização, propriedades dielétricas e campo aplicado, é caracterizada por um determinado padrão de descargas [GULSKI, 1995 b]. O princípio de reconhecimento de padrões de descarga é baseado na comparação entre uma medida de descargas parciais de uma fonte não conhecida e referências de padrões conhecidos. Estes padrões conhecidos são utilizados para a construção de dois bancos de dados, sendo um obtido a partir de defeitos gerados artificialmente sob condições controladas e outro a partir de defeitos industriais, i.e., defeitos encontrados na isolação de equipamentos elétricos. Desta forma é possível avaliar o grau de correspondência entre diferentes referências [GULSKI, 1995a e b, KRIVDA, 1995a, KRANZ, 2000]. Ainda, a utilização de padrões de distribuição em conjunto com redes neurais tem permitido identificar os tipos de defeitos que geram descarga parcial em materiais dielétricos [KRIVDA, 1995 a, KELEN, 1995, LALITHA, 1998, KRANZ, 1993 e 2000, BORSI, 2000, LALITHA, 2000]. A forma do padrão $n-q-\phi$ e das demais distribuições mudam com o tempo, tornando possível, além do reconhecimento das fontes de descargas parciais, a realização do acompanhamento do envelhecimento da isolação ao longo do tempo [GULSKI, 1995 a].

As distribuições de magnitude $H_n(q)$ e fase $H_n(\phi)$ contêm informação qualitativa relevante sobre a atividade das descargas parciais em sistemas de isolação. Todavia,

muitas vezes é importante fazer uma análise quantitativa destas distribuições para obter as características das descargas parciais e avaliar o grau de risco associado a sua atividade [GULSKI, 1995 a e b]. Parâmetros estatísticos das distribuições - média, desvio padrão, assimetria e curtose – têm sido utilizados para estabelecer correlação com os tipos de defeitos geradores de descargas parciais e com estágios de envelhecimento do material até a sua ruptura dielétrica [OKAMOTO, 1986; GULSKI, 1992 e 1995c, CHAMPION, 1995, JAMES, 1995, TSURU, 1999]. Destes parâmetros, a assimetria e a curtose, principalmente este primeiro, mostraram-se promissores nos procedimentos de reconhecimento de defeitos [GULSKI, 1992, GULSKI, 1995b], acompanhamento do crescimento de arborescências elétricas [OKAMOTO, 1986] e envelhecimento de materiais isolantes e equipamentos de alta tensão [GULSKI, 1995c]. Em adição aos parâmetros citados, os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull têm sido utilizados para elaboração de modelos de envelhecimento [MONTANARI, 1995 e 2000, BOZZO, 1995 e 1998, CONTIN, 1998 e 2000]. Estes modelos são baseados em medidas de descargas parciais, as quais ocorrem em arborescências elétricas induzidas por estresse elétrico [MONTANARI, 1995 e 2000]. Parâmetros quantitativos relativos às características de fractais das descargas também têm sido utilizados para descrição do padrão $n-q-\phi$ [KRIVDA, 1995 a e b].

4.2.3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS DISTRIBUIÇÕES

A partir das distribuições estatísticas $H_n(\phi)$ e $H_n(q)$ parâmetros estatísticos podem ser obtidos. Seja $f(x_i)$ o número de ocorrências e x_i o ângulo de fase da ocorrência de descargas parciais, a média (μ), o desvio padrão (σ) e a assimetria (s) da distribuição $H_n(\phi)$ podem ser calculados através das seguintes equações:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \cdot f(x_i)}{\sum_{i=1}^n f(x_i)}} \quad s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \cdot f(x_i)}{\sigma^3 \cdot \sum_{i=1}^n f(x_i)}$$

A assimetria mede o grau de desvio ou afastamento de uma distribuição. Assim, para uma distribuição simétrica com relação à média, tal como a distribuição normal, o valor da assimetria será nulo. Assimetria positiva significa que a distribuição está desviada à direita; assimetria negativa significa que a distribuição está desviada à esquerda [MARTINS, 2002]. Nas figuras 4.5 e 4.6 é apresentado uma representação dos parâmetros média, desvio padrão e assimetria na distribuição $H_n(\phi)$.

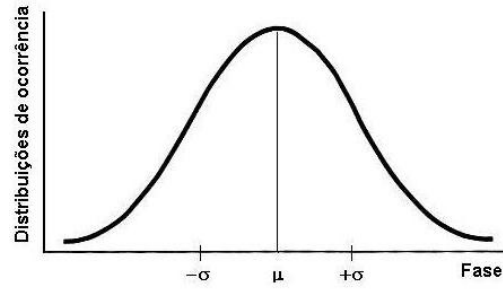


Figura 4.5. Representação da média e desvio padrão na distribuição $H_n(\phi)$.

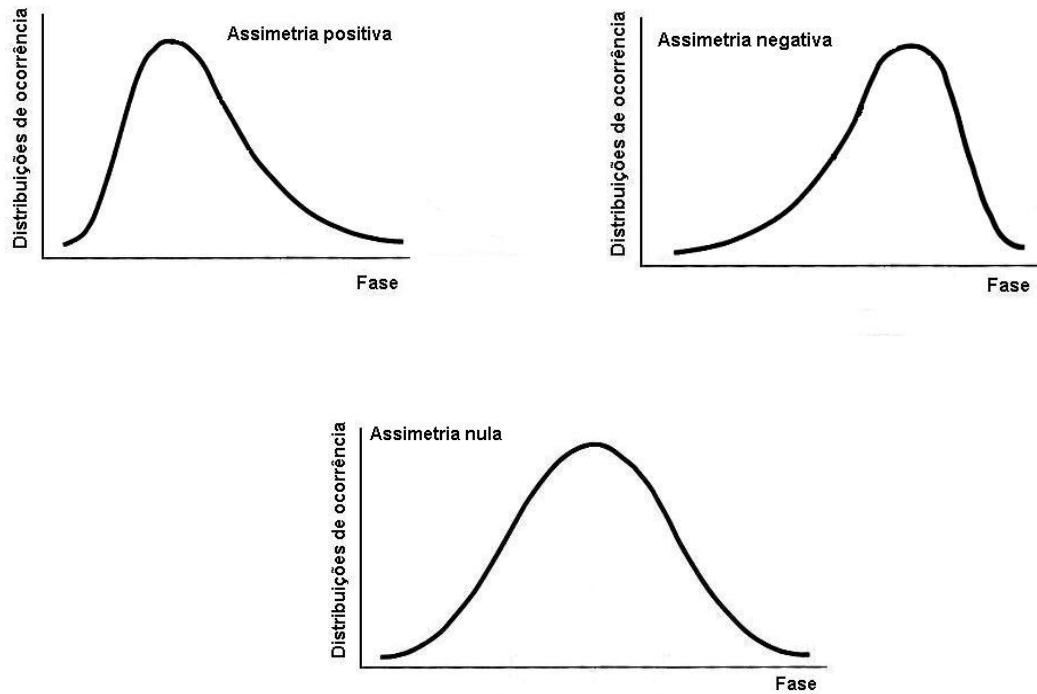


Figura 4.6. Representação da assimetria na distribuição $H_n(\phi)$.

Da distribuição $H_n(q)$ a moda da distribuição pode ser obtida, a qual é ilustrada na figura 4.7. A moda representa o valor que ocorre com maior frequência em uma distribuição [MARTINS, 2002].

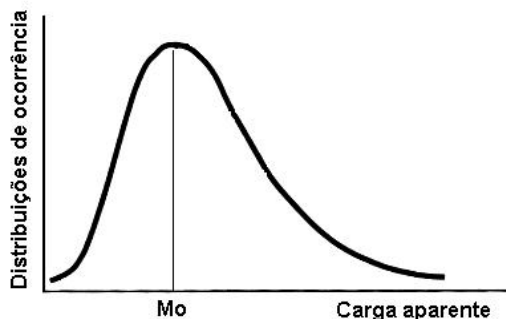


Figura 4.7. Representação da moda na distribuição $H_n(q)$.

A escolha pela utilização destes parâmetros no presente trabalho é justificada pelas seguintes razões: (i) no caso da distribuição $H_n(\phi)$ a média e o desvio padrão fornecem o ângulo onde as descargas ocorrem com maior probabilidade e o parâmetro assimetria permite monitorar o efeito do aumento da intensidade de raios-X na distribuição; (ii) no caso da distribuição $H_n(q)$ a moda representa o pico de maior ocorrência de descargas e este, por sua vez, está relacionado a um valor de carga aparente.

5. EXPERIMENTAL

5.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras de epóxi e polietileno com vazios esferoidais foram preparadas para as medidas de descargas parciais estimuladas por raios-X. A escolha por esta geometria deve-se ao fato de que, na prática, os vazios tendem a aproximar-se a uma forma esférica. A preparação das amostras foi dividida em quatro etapas: confecção dos porta-amostras, preparação dos materiais (epóxi e polietileno) com vazios esféricos, fixação dos materiais nos porta-amostras e inserção dos eletrodos.

5.1.1. CONFECÇÃO DOS PORTA-AMOSTRAS

Porta-amostras de acrílico, de dimensões 5 cm x 5 cm, espessura 2 mm e com um vazado de 3 cm de diâmetro foram confeccionados, tendo como principal função servir de suporte para o material a ser testado. A figura 5.1 apresenta uma representação esquemática do porta-amostra. Os porta-amostras foram fixados sobre uma chapa de vidro, a qual foi coberta com um filme de transparência embebido em silicone. O silicone tem como função evitar a geração de trincas quando da retirada da resina depositada no porta-amostra.

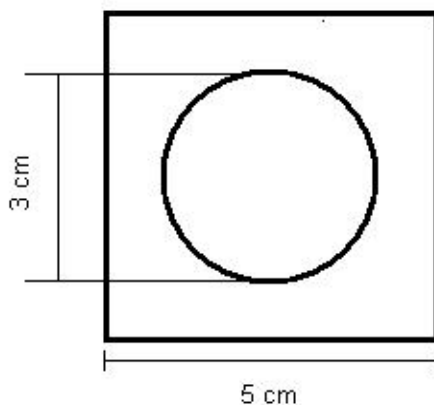


Figura 5.1. Representação de um porta-amostra.

5.1.2. PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

Os diferentes materiais testados, epóxi e polietileno, foram preparados de maneira distinta. No caso do epóxi, para cada amostra, 3 g de resina epóxi líquida DER-331[®] foram colocadas em um Béquer e misturadas com 0,39 g do agente de cura DEH-24[®]. A mistura foi homogeneizada com um bastão de vidro e levada ao equipamento de ultra-som COLE PARMER, modelo 8891, para eliminação dos vazios formados durante o processo de mistura. A resina epóxi, livre de vazios, foi então depositada nos porta-amostras. Com uma seringa foram injetadas bolhas de ar na resina a fim de induzir a formação de vazios esféricos. Induzidos os vazios, as amostras foram deixadas em repouso durante 24 h para cura completa. Após a cura os vazios esféricos presentes no volume da resina foram selecionados, recortados e armazenados para composição da amostra.

As amostras de polietileno de baixa densidade (LDPE) foram obtidas através de outro procedimento. Grânulos de polietileno de baixa densidade foram depositados em moldes metálicos de 10 cm x 10 cm e 2 mm de espessura. O molde, preenchido com o material, foi levado a uma termoprensa. Ao molde foi aplicada temperatura de 150°C e pressão de 6 toneladas durante 2 minutos. Decorrido este período as placas de LDPE foram resfriadas em água corrente e retiradas dos moldes. Durante este processo vazios esféricos formam-se na placa de forma aleatória, ora localizados próximos uns aos outros, ora localizados de forma isolada. De cada placa produzida foram selecionados e armazenados vazios com distintos diâmetros. O diâmetro dos vazios selecionados, tanto de epóxi quanto de polietileno, foi medido com um microscópio ótico MAEKAWA.

5.1.3. FIXAÇÃO DO MATERIAL NO PORTA-AMOSTRA

Uma vez determinados os diâmetros dos vazios estes foram levados a um novo porta-amostra, onde então uma nova quantidade de resina epóxi livre de vazios foi preparada para preencher o restante do espaço do vazado do porta-amostra e fixar o material com o vazio esférico centralizado ao mesmo. Obtém-se então o conjunto porta-amostra/ material.

5.1.4. INSERÇÃO DOS ELETRODOS

Para finalização da amostra, barras cilíndricas de alumínio com 3 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro foram utilizadas para a confecção do eletrodo de alta tensão. O eletrodo foi aderido ao conjunto porta-amostra/ material com cola Araldite®. O eletrodo de alta tensão foi revestido com resina epóxi, livre de vazios, para evitar a ocorrência de descargas corona e superficiais e assegurar que as descargas induzidas durante as medidas sejam somente descargas parciais internas provenientes do vazio gerado artificialmente. O eletrodo de baixa tensão é feito com tinta prata. Uma representação em corte da amostra é apresentada na figura 5.2.

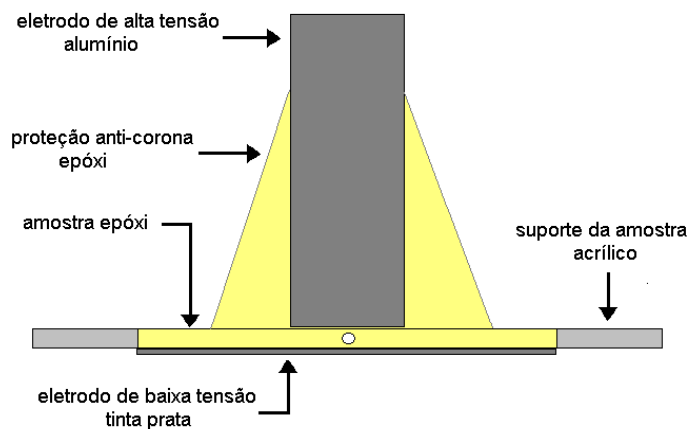


Figura 5.2. Representação em corte da amostra.

5.2. ARRANJO EXPERIMENTAL

Um esquema do arranjo experimental utilizado para medida de descargas parciais estimuladas por raios-X, contínuo e pulsado, é mostrado na figura 5.3. Para a geração do feixe de raios-X foi utilizado um equipamento de raios-X modelo CHF160S Gilardoni, o qual utiliza tubo com alvo de tungstênio e admite tensão máxima de 160 kV e corrente máxima de 10 mA. O tubo de raios-X gera um feixe contínuo, o qual é colimado através de um colimador de chumbo com 5 mm de diâmetro.

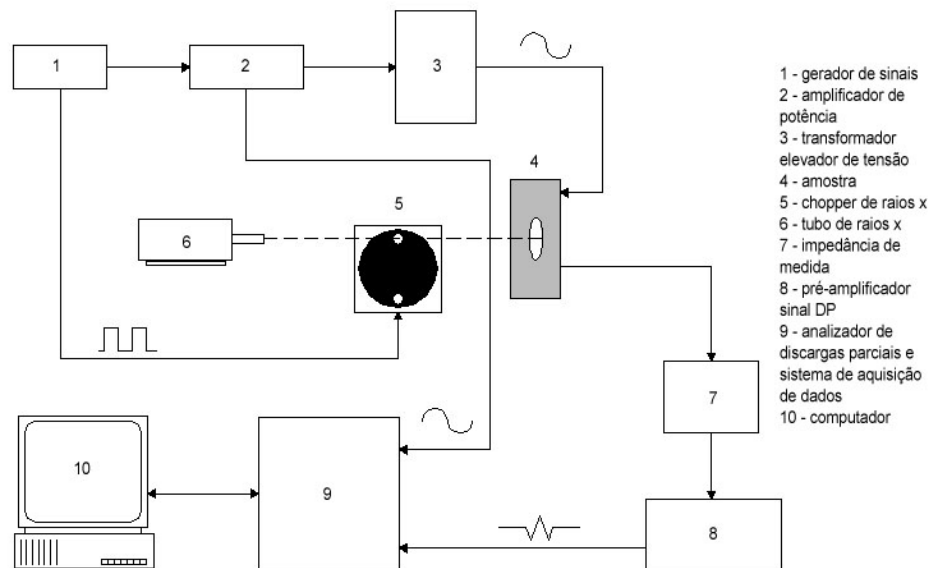


Figura 5.3. Esquema do arranjo experimental utilizado para as medidas de descargas parciais.

Para as medidas de descargas parciais com raios-X pulsado foi inserido um *chopper* entre o tubo de raios-X e a amostra. O *chopper* consiste de um disco de chumbo, acionado por um motor elétrico, que gira com rotação constante. O disco de chumbo possui duas janelas retangulares, as quais interrompem e liberam o fluxo de raios-X. Cada janela do *chopper* corresponde a um ângulo de 20° . A abertura temporal do feixe de raios-X é detectada por um foto-acoplador. Por sua vez, o foto-acoplador é usado para sincronizar o gerador de sinal senoidal. O gerador de sinal senoidal permite o ajuste de sua amplitude entre 0 e 1 V_{pp} , assim como o ajuste do deslocamento de fase. Conforme ilustrado na figura 5.4, o deslocamento de fase é ajustado de modo que dois pulsos de raios-X ocorrem em cada ciclo, um em cada semiciclo da tensão aplicada. O ângulo de abertura do *chopper*, que é de 20° , em conjunto com o deslocamento de fase permitem que a faixa de ângulo de disparo nas medidas com raios-X pulsado esteja entre 0° e 180° para o semiciclo positivo e 180° e 360° no semiciclo negativo.

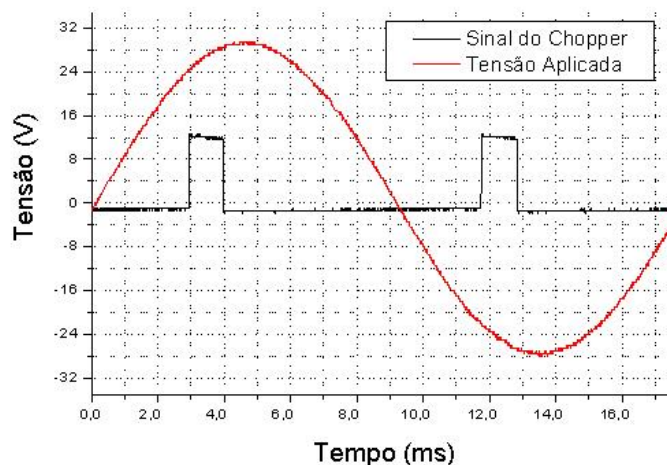


Figura 5.4. Ajuste de fase (ângulo de disparo) para as medidas com raios-X pulsado.

O sinal de saída do gerador de sinal senoidal é amplificado em um amplificador Bruel & Kjaer® modelo 2713 e elevado em um transformador elevador de potencial Osaki Electric Ltd.® tipo EM10C com relação de transformação 1:120, de modo que uma tensão alternada de no máximo $12 \text{ kV}_{\text{rms}}$ em 60 Hz, livre de harmônicas, pode ser aplicada à amostra. Para as medidas de descargas parciais com raios-X contínuo o *chopper* é retirado do arranjo. O arranjo experimental utilizado para as medidas com raios-X contínuo e pulsado é ilustrado na figura 5.5.

As descargas parciais estimuladas por raios-X foram registradas usando um analisador de descargas parciais com resolução em fase desenvolvido no LACTEC [SWINKA-FILHO, 2000]. O analisador detecta a ocorrência de pulsos de descarga e registra a amplitude e o ângulo de fase de cada descarga, durante um certo período de medida e, em seguida, transfere estes dados para o microcomputador. Com estes dados, as distribuições estatísticas de magnitude $H_n(q)$ e fase $H_n(\phi)$ foram obtidas.

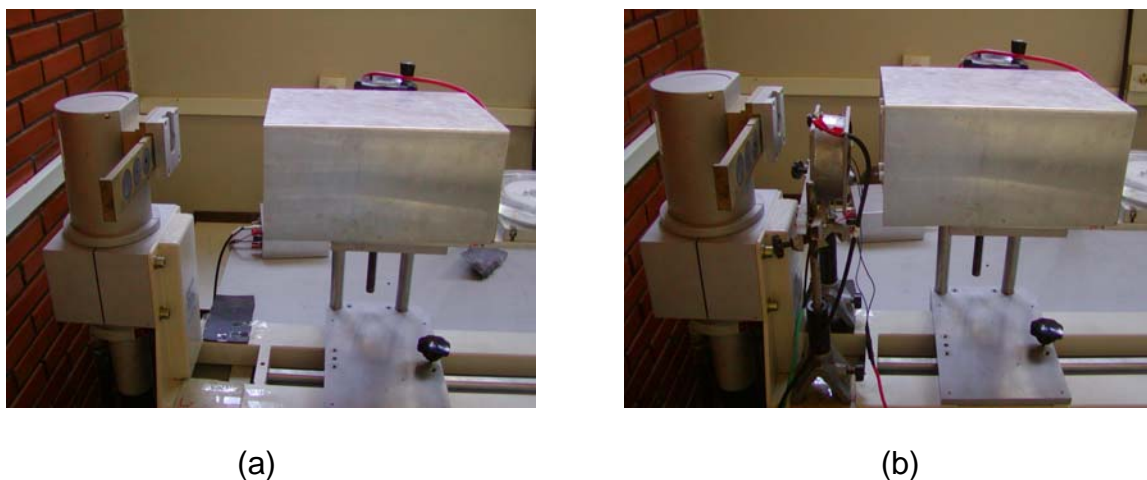


Figura 5.5. Arranjo experimental utilizado para medidas com raios-X (a) contínuo e (b) pulsado.

O arranjo experimental utilizado apresenta algumas limitações. Estas são:

- (i) não detecção de vazios menores do que 0,3 mm. Este limite foi determinado experimentalmente em [SWINKA-FILHO, 2000];
- (ii) por limitação da eletrônica do gerador de sinais a faixa de ângulo de disparo tem seu início em 10° e termina em 350° ;
- (iii) a carga aparente máxima registrada nas distribuições $H_n(q)$ é de 130 pC, devido ao limite do detector. Assim, vazios maiores que 0,9 mm não tem definido seu valor de carga aparente, uma vez que ultrapassam o limite do detector. Esta terceira limitação não tem efeito sobre a distribuição $H_n(\phi)$. As limitações do arranjo experimental fizeram com que a faixa de diâmetros dos vazios utilizados na etapa experimental ficasse entre 0,3 e 0,9 mm e com que a faixa de ângulo de disparo alcançada pelo arranjo nas medidas com raios-X pulsado seja de 10° a 170° no semiciclo positivo e de 190° a 350° no semiciclo negativo.

5.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.3.1. DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE INÍCIO E EXTINÇÃO

Antes do início das medições o analisador foi calibrado de forma a estabelecer uma relação entre a amplitude do pulso medido e a carga aparente transferida em cada descarga. Para tanto foi utilizado um calibrador portátil de descargas parciais ENRAF. A tensão de início foi determinada com aplicação simultânea de tensão alternada e raios-X contínuo (35 kV–1 mA) para as amostras de epóxi e de polietileno. A tensão foi

continuamente elevada a partir de 3 kV até a ocorrência das primeiras descargas. O valor registrado como tensão de início foi o valor de tensão no qual ocorreram as primeiras descargas sustentadas. Uma vez determinado o valor da tensão de início, a tensão aplicada na amostra foi gradualmente reduzida até o desaparecimento completo das descargas, determinando-se assim a tensão de extinção.

5.3.2. MEDIDAS DE DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO E PULSADO

Nas medidas de descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo foram utilizadas as seguintes condições de teste:

- para as amostras de epóxi tensão aplicada de 9 e 10 kV_{rms} (equivalente a campo elétrico aplicado de, respectivamente, 4,5 e 5 kV/mm);
- para as amostras de polietileno tensão aplicada de 6 e 7 kV_{rms} (equivalente a campo elétrico aplicado de, respectivamente, 3 e 3,5 kV/mm);
- intensidade de raios-X de 1, 2 e 4 mA para uma diferença de potencial de 35 kV.

As medidas com raios-X pulsado foram realizadas com tensão aplicada fixa, sendo variadas a intensidade de raios-X e a faixa de ângulo de disparo. As condições impostas durante os testes foram:

- intensidade de raios-X de 1, 2 e 4 mA para uma diferença de potencial de 35 kV;
- faixa de ângulo de disparo de 10° a 170° para o semiciclo positivo e 190° a 350° para o semiciclo negativo, com intervalos regulares de 20°.

Para cada medida 2000 ciclos foram analisados. Este número de ciclos foi escolhido por permitir a aquisição de uma quantidade significativa de ocorrências de descargas. A partir dos dados coletados as distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ foram obtidas.

Da distribuição $H_n(q)$ foram calculados valores para a carga aparente total por ciclo através da seguinte equação:

$$\text{Carga aparente total por ciclo} = \frac{\sum q_i n_i}{N}$$

onde q_i é o valor das i cargas aparentes da distribuição, n_i é o número de ocorrências de cada carga aparente q_i (conforme figura 5.6) e N é o número de ciclos registrados durante cada medida. Em nosso caso, $N=2000$.

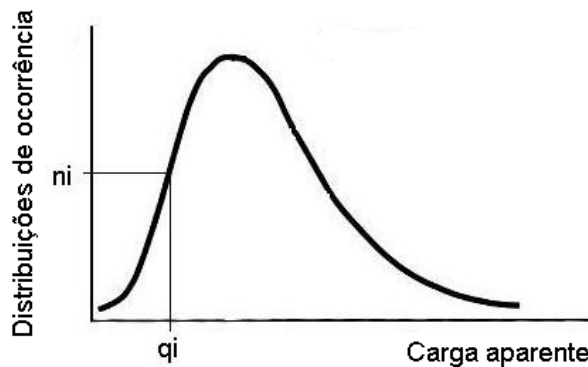


Figura 5.6. Parâmetros utilizados para o cálculo da carga aparente total por ciclo.

A partir da distribuição $H_n(\phi)$ os parâmetros estatísticos média, desvio padrão e assimetria foram obtidos de acordo com as equações citadas no item 4.2.3.

5.3.3. INFLUÊNCIA DA ATENUAÇÃO DO FEIXE DE RAIOS-X

Com o intuito de verificar a influência da atenuação do feixe de raios-X nas amostras testadas foi calculado, através da Lei de Lambert-Beer, a relação I/I_o para o epóxi e o polietileno. Segundo a Lei de Lambert-Beer [HOWATSON, 1970], temos que:

$$I = I_o e^{-\mu x} \Rightarrow \frac{I}{I_o} = e^{-\mu x}$$

onde

I – intensidade de raios-X, em x

I_o – intensidade incidente no material

μ - coeficiente de atenuação linear, em cm^{-1}

x – comprimento de propagação do feixe no material, equivalente a espessura da amostra (2 mm)

Para a obtenção da relação I/I_o procedeu-se primeiramente ao cálculo do coeficiente de atenuação linear μ . Para tanto, foram obtidos da literatura [FELDMAN,

1996; BERTHELOT, 1999; <http://physics>, 2004] valores do coeficiente de absorção de energia e de densidade para os materiais utilizados no presente trabalho, os quais são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Coeficiente de absorção de energia e densidade para o epóxi e o polietileno			
Material	Coeficiente de absorção de energia $\mu_{en}/\rho \left(\text{cm}^2/\text{g} \right)$ para RX 35 kV [http://physics , 2004]	Densidade $\rho \left(\text{g}/\text{cm}^3 \right)$ [FELDMAN, 1996; BERTHELOT, 1999]	Valor utilizado de densidade para fins de cálculo $\rho \left(\text{g}/\text{cm}^3 \right)$
LDPE	$4,00 \times 10^{-2}$	0,91 – 0,93	0,92
Epóxi	$5,50 \times 10^{-2}$	1,10 – 1,50	1,30

O coeficiente de atenuação linear μ foi calculado através da expressão:

$$\mu_{\text{MATERIAL}} = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \rho_{\text{MATERIAL}}$$

Para o polietileno e o epóxi os valores de μ encontrados foram:

$$\mu_{PE} = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \rho_{PE} = 4,00 \times 10^{-2} \cdot 0,92 = 3,68 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu_{EP} = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \rho_{EP} = 5,50 \times 10^{-2} \cdot 1,30 = 6,60 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

Com os valores calculados dos coeficientes de atenuação linear do polietileno e do epóxi e, considerando que a espessura x das amostras é 2 mm, pode-se obter a relação I/I_o para cada um dos materiais.

Temos então,

Para o polietileno:

$$\frac{I}{I_o} = e^{-\mu x} = e^{-0,2.(3,68 \times 10^{-2})} = e^{-7,4 \times 10^{-3}} = 0,99$$

$$I = 0,99 I_o$$

Para o epóxi:

$$\frac{I}{I_o} = e^{-\mu x} = e^{-0,2.(6,60 \times 10^{-2})} = e^{-1,32 \times 10^{-2}} = 0,98$$

$$I = 0,98 I_o$$

Desta forma, temos que $I \cong I_o$. Pode-se então afirmar que, para os materiais e energia de raios-X utilizados no presente trabalho, a intensidade de raios-X incidente no vazio independe da posição do mesmo no interior da amostra.

5.3.4. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ANÁLISE DE ENERGIA DISPERSIVA

A fim de verificar se a atividade de descargas parciais estimuladas com raios-X provoca degradação dos materiais durante o período de teste foram realizadas medidas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de energia dispersiva (EDS).

Para tanto, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura, marca PHILIPS, modelo XL30 acoplado com analisador de energia dispersiva de raios-X, marca EDAX.

As medidas de MEV e EDS foram realizadas em 3 diferentes amostras novas de epóxi e LDPE, i.e., sem ocorrência prévia de descargas parciais e 3 diferentes amostras de epóxi e LDPE após realização do teste de descargas estimuladas com raios-X. As amostras foram preparadas de acordo com o procedimento descrito no item 5.1. Para as amostras novas, os vazios foram seccionados imediatamente após a preparação do conjunto porta-amostra/ material. As demais amostras foram levadas à teste e, após realização do mesmo, procedeu-se à retirada dos eletrodos de alta e baixa tensão e, então, o seccionamento dos vazios. Foi então realizada a eletrodeposição de uma fina camada de ouro em cada uma amostras para realização das medidas de MEV e EDS.

As imagens obtidas através da microscopia foram utilizadas para verificar a geometria dos vazios e, ainda, visualizar possíveis alterações morfológicas no material. Com a técnica de EDS foi obtida a proporção dos elementos químicos presentes nos vazios, antes e após a ocorrência de descargas parciais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que não foi realizada uma medida da intensidade de raios-X e que o ajuste da intensidade é realizado através do ajuste da corrente no tubo nos referimos neste capítulo à intensidade de raios-X pelo valor da corrente anodo-catodo. Ainda, levando em conta que o tubo de raios-X emite um espectro contínuo de energia, cuja energia máxima é dada em keV, temos seu correspondente valor numérico ajustado em kV.

6.1. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO

6.1.1. TENSÃO DE INÍCIO E DE EXTINÇÃO

A tabela 6.1 apresenta os valores de tensão de início e extinção para amostras de epóxi e polietileno novas, i.e., sem ocorrência prévia de descargas parciais. Da tabela e figura 6.1 pode ser observado que a tensão de início é maior para vazios com menor diâmetro. As medidas de tensão de início e de extinção da amostra de epóxi E3 não foram inseridas na figura 6.1, uma vez que tais medidas foram realizadas com uma energia diferente das demais. Para medidas realizadas com energia menor do que 50 keV não houve indução de descargas parciais na amostra E3.

Quando o teste para determinar a tensão de início e de extinção é iniciado as condições necessárias para ocorrência das descargas ainda não estão preenchidas. Enquanto a tensão está sendo gradualmente elevada, os fótons de raios-X estão sendo

emitidos em direção à amostra. A probabilidade de geração de um elétron inicial no interior do vazio será maior para vazios com maior diâmetro devido a seu maior volume. Sendo maior esta probabilidade, os elétrons iniciais serão gerados num tempo menor e, conseqüentemente, em um menor valor de tensão de início.

Tabela 6.1: Tensão de início e extinção para as amostras de epóxi e de polietileno				
Amostra	Diâmetro do vazio (mm)	Intensidade de Raios-X	Tensão de início (kV)	Tensão de extinção (kV)
EPÓXI				
E3	0,3	50 kV-1mA	8,4	7,8
E4	0,4	35kV-1mA	9,2	8,1
E5	0,5	35kV-1mA	9,0	7,8
E6	0,6	35kV-1mA	8,0	7,1
E7	0,7	35kV-1mA	7,5	6,7
E8	0,8	35kV-1mA	7,4	6,8
E9	0,9	35kV-1mA	7,2	6,8
POLIETILENO				
P3	0,3	35kV-1mA	6,2	4,7
P4	0,4	35kV-1mA	6,2	4,8
P5	0,5	35kV-1mA	5,3	4,2
P6	0,6	35kV-1mA	5,3	4,4
P7	0,7	35kV-1mA	5,1	4,1
P8	0,8	35kV-1mA	5,1	4,0
P9	0,9	35kV-1mA	4,8	4,0

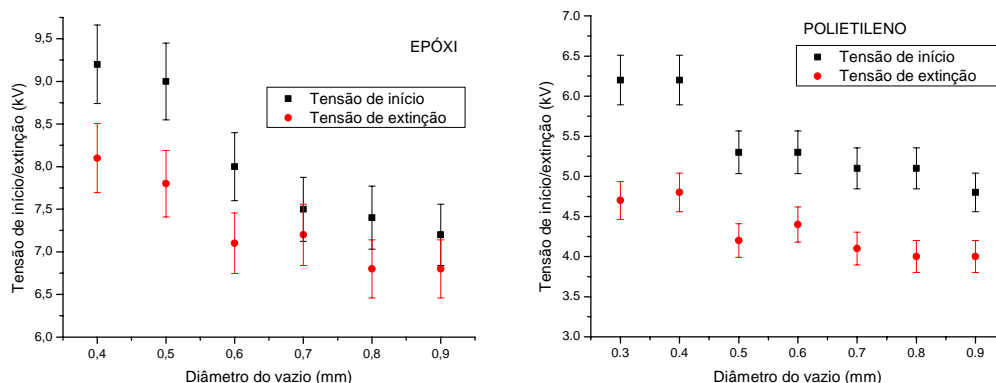


Figura 6.1. Tensão de início e extinção para as amostras de epóxi e de polietileno.

6.1.2. DISTRIBUIÇÕES $H_n(q)$ E $H_n(\phi)$

As figuras de 6.2 a 6.15 apresentam as distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para as amostras de epóxi e polietileno quando sob irradiação de raios-X contínuo. Os resultados apresentados referem-se a amostras de epóxi e polietileno com diâmetros distintos. Deve ser observado que, para alguns diâmetros, as medidas foram realizadas em mais de uma amostra. Devido à reprodutibilidade dos padrões observados as medidas duplicadas não serão apresentadas.

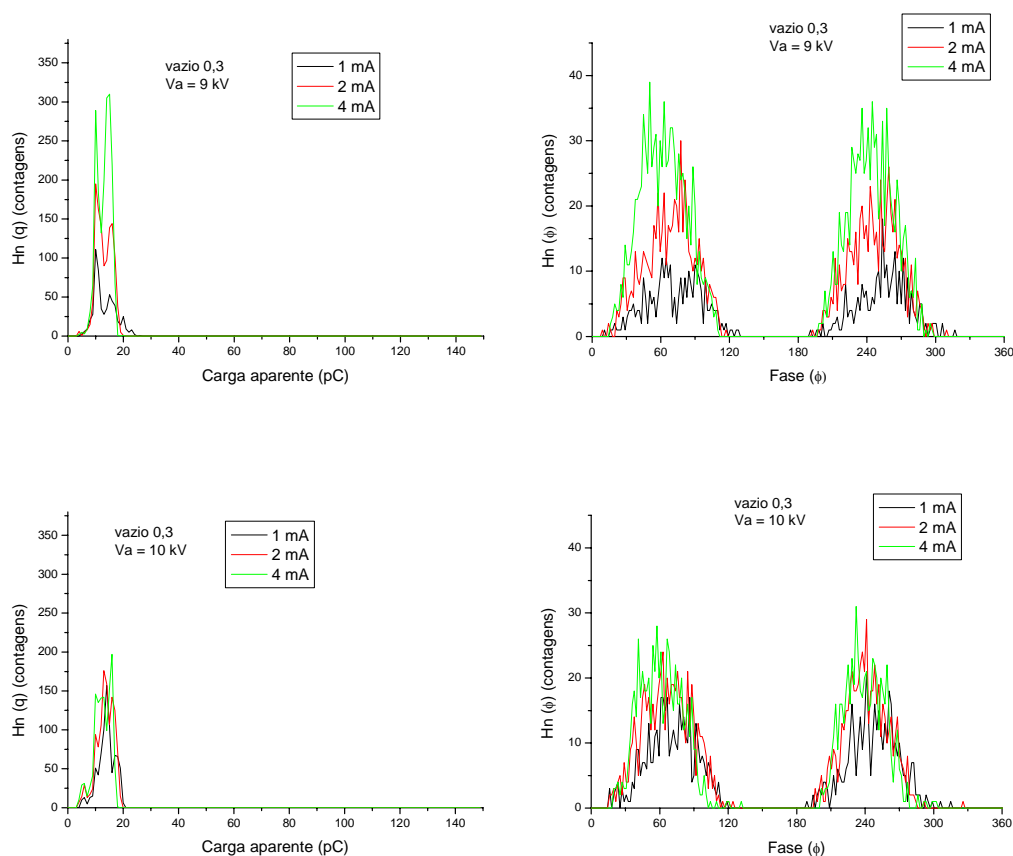


Figura 6.2. Amostra de epóxi, E3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (50 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

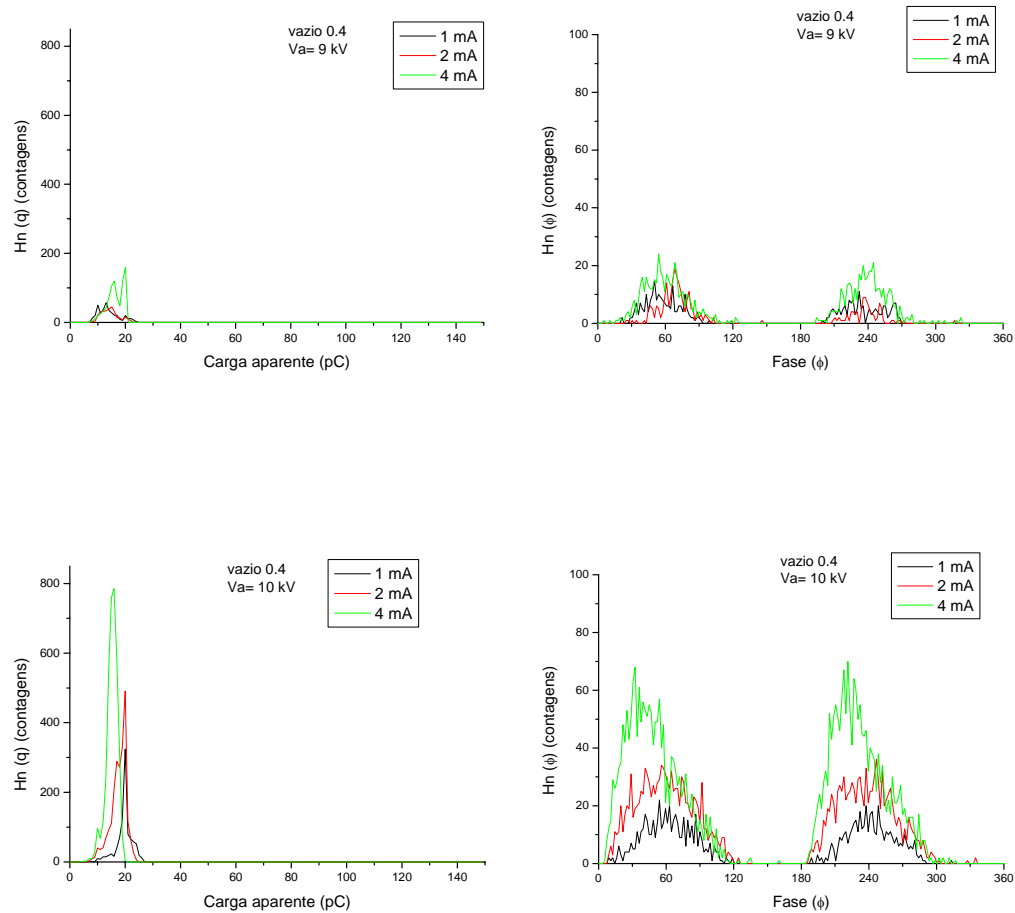


Figura 6.3. Amostra de epóxi, E4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

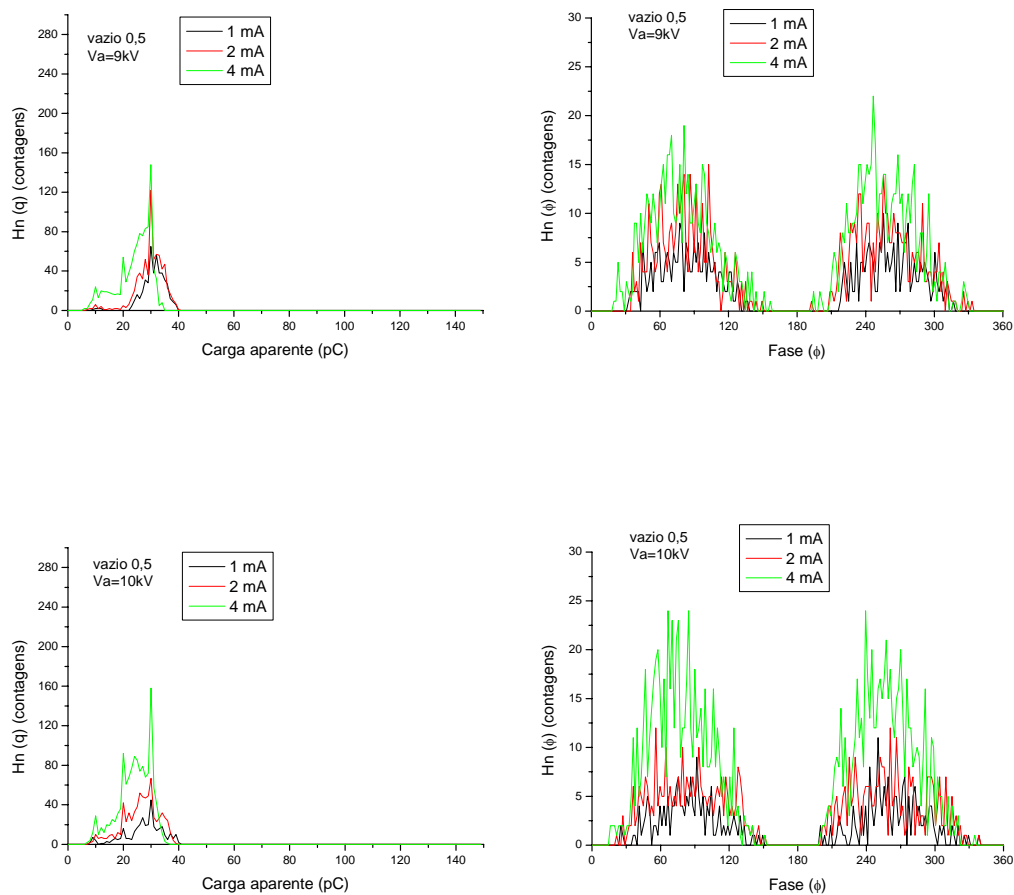


Figura 6.4. Amostra de epóxi, E5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

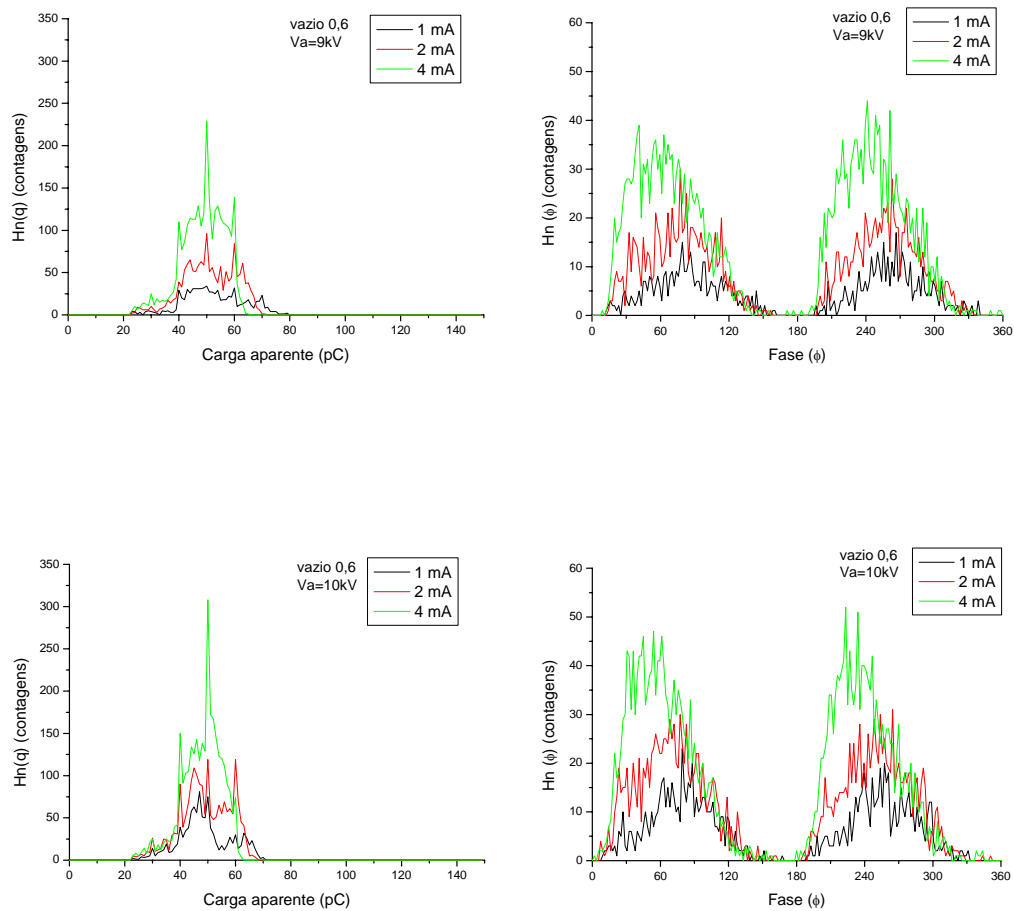


Figura 6.5. Amostra de epóxi, E6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

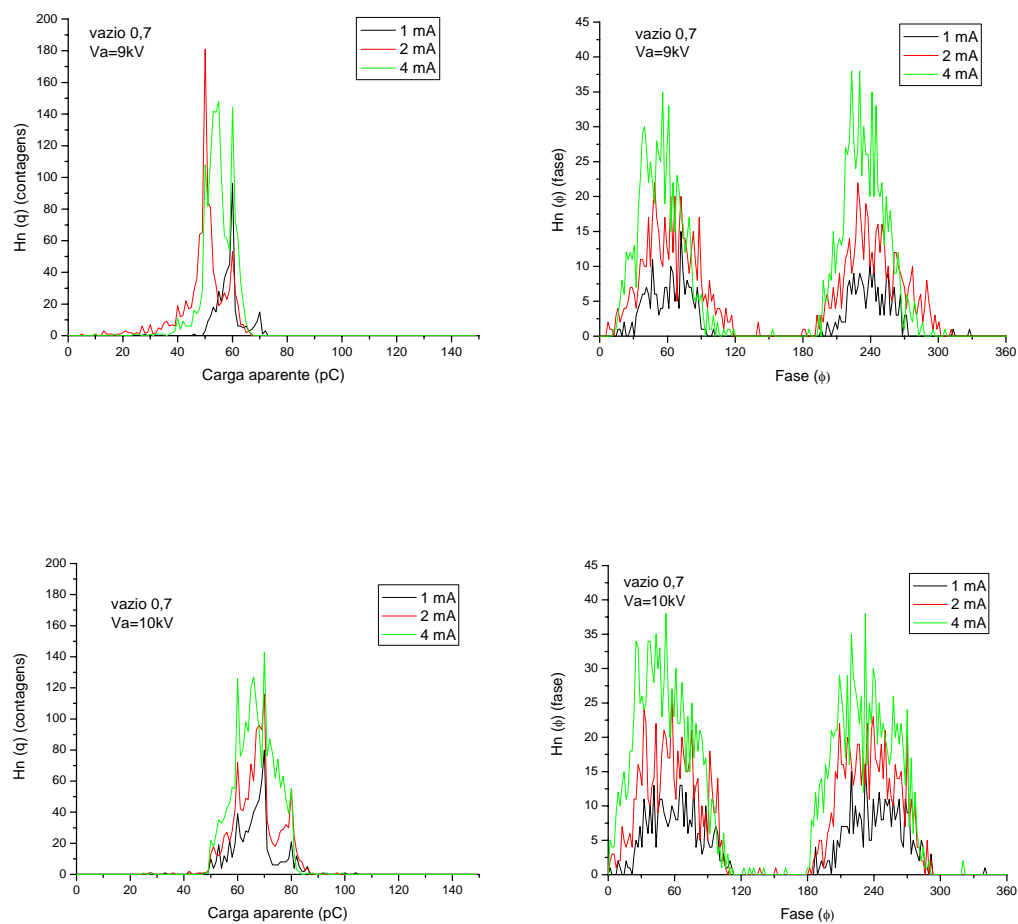


Figura 6.6. Amostra de epóxi, E7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA , 2 mA e 4 mA).

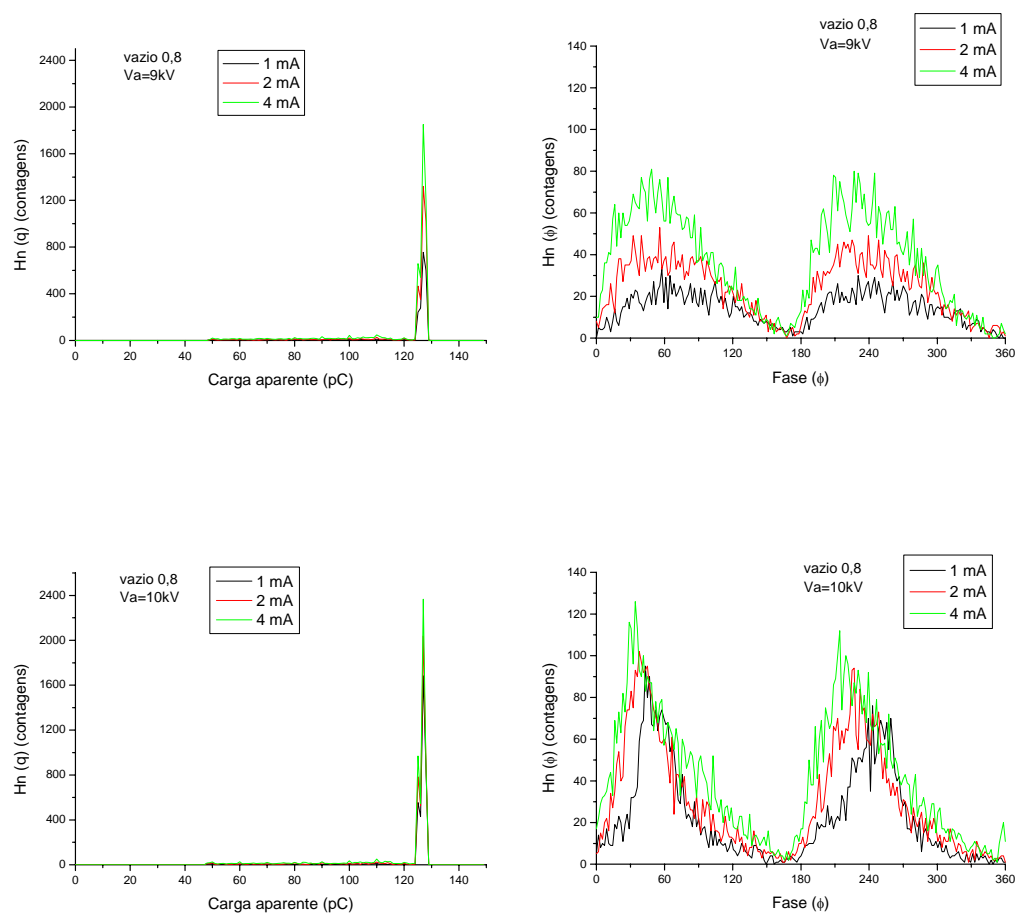


Figura 6.7. Amostra de epóxi, E8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

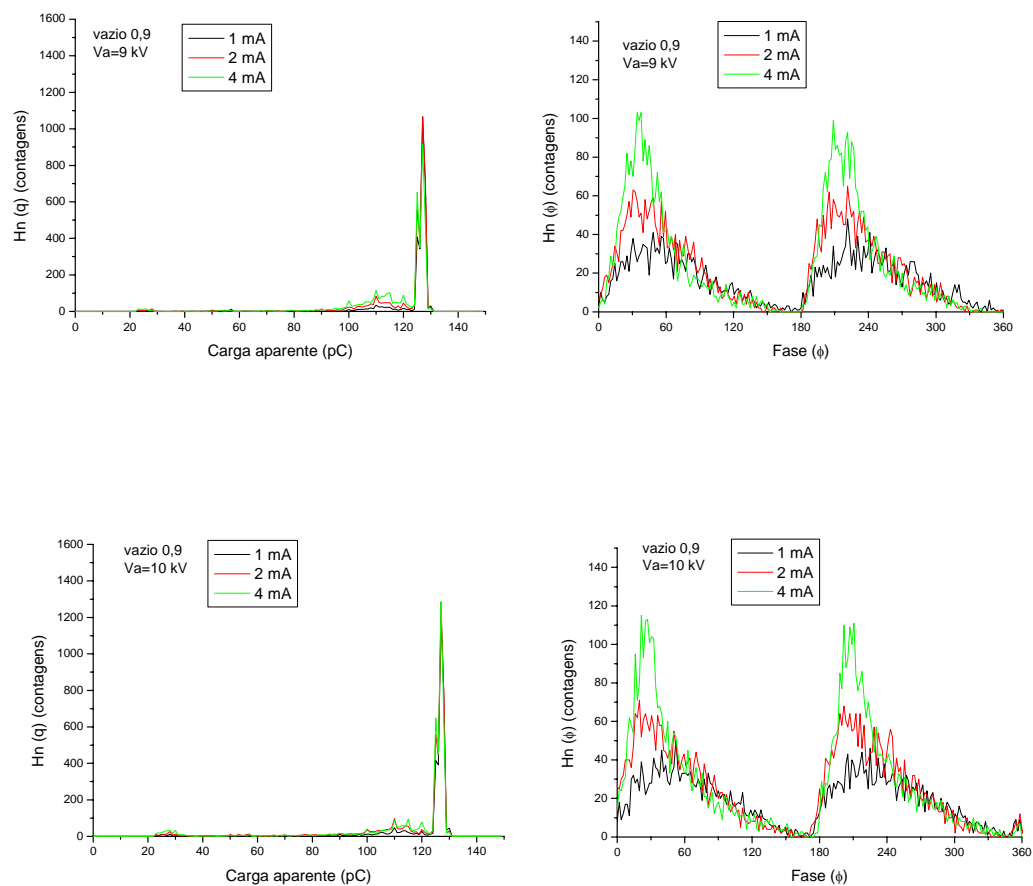


Figura 6.8. Amostra de epóxi, E9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

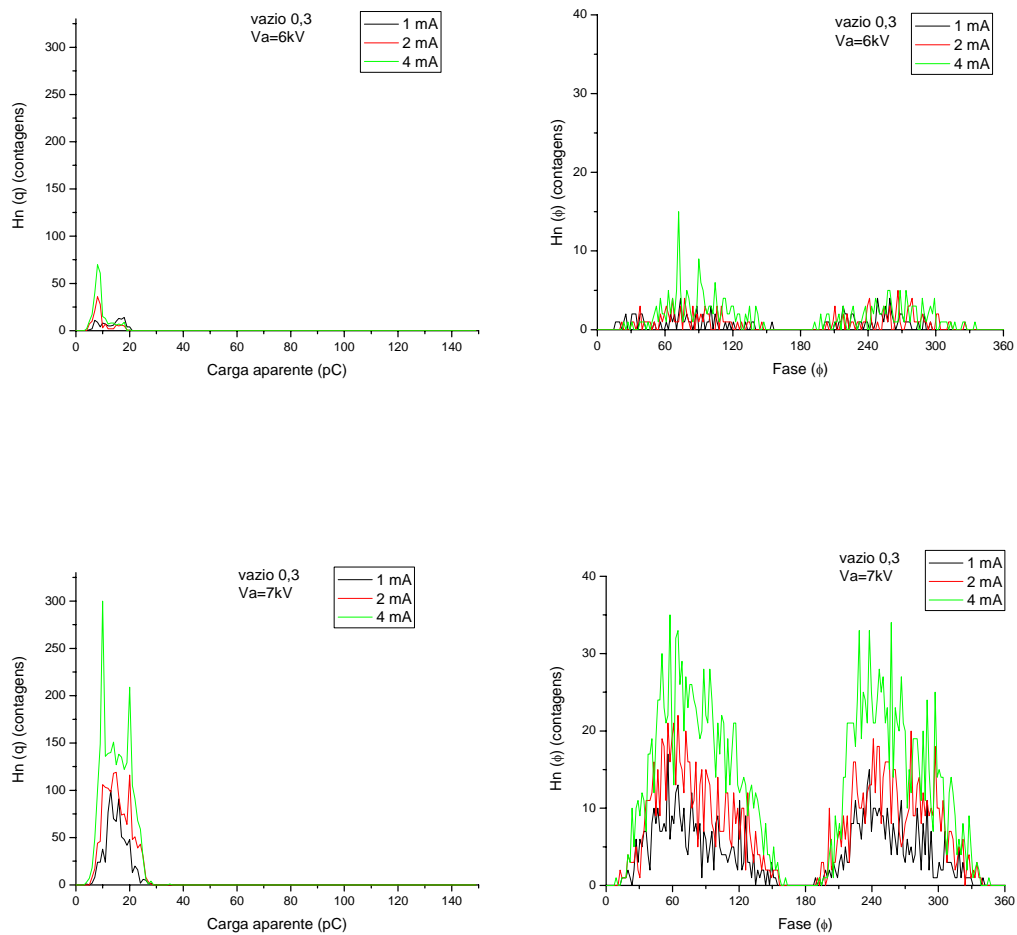


Figura 6.9. Amostra de polietileno, P3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

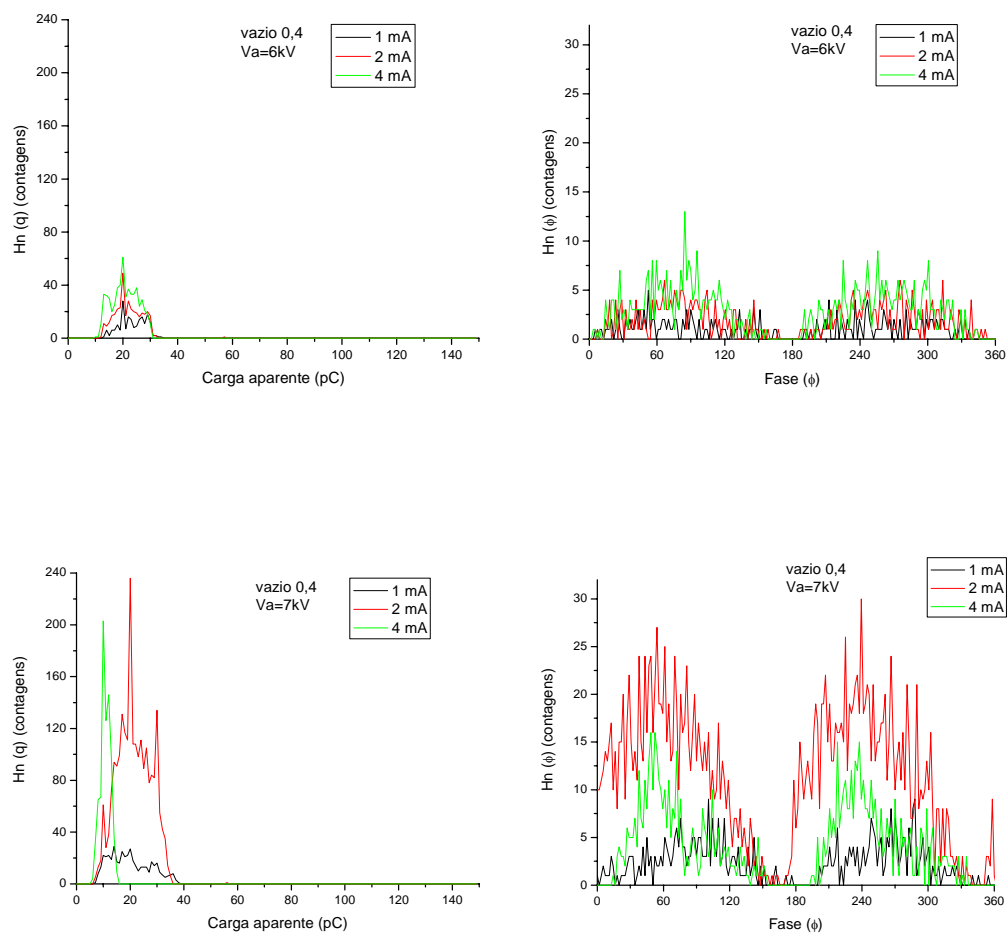


Figura 6.10. Amostra de polietileno, P4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

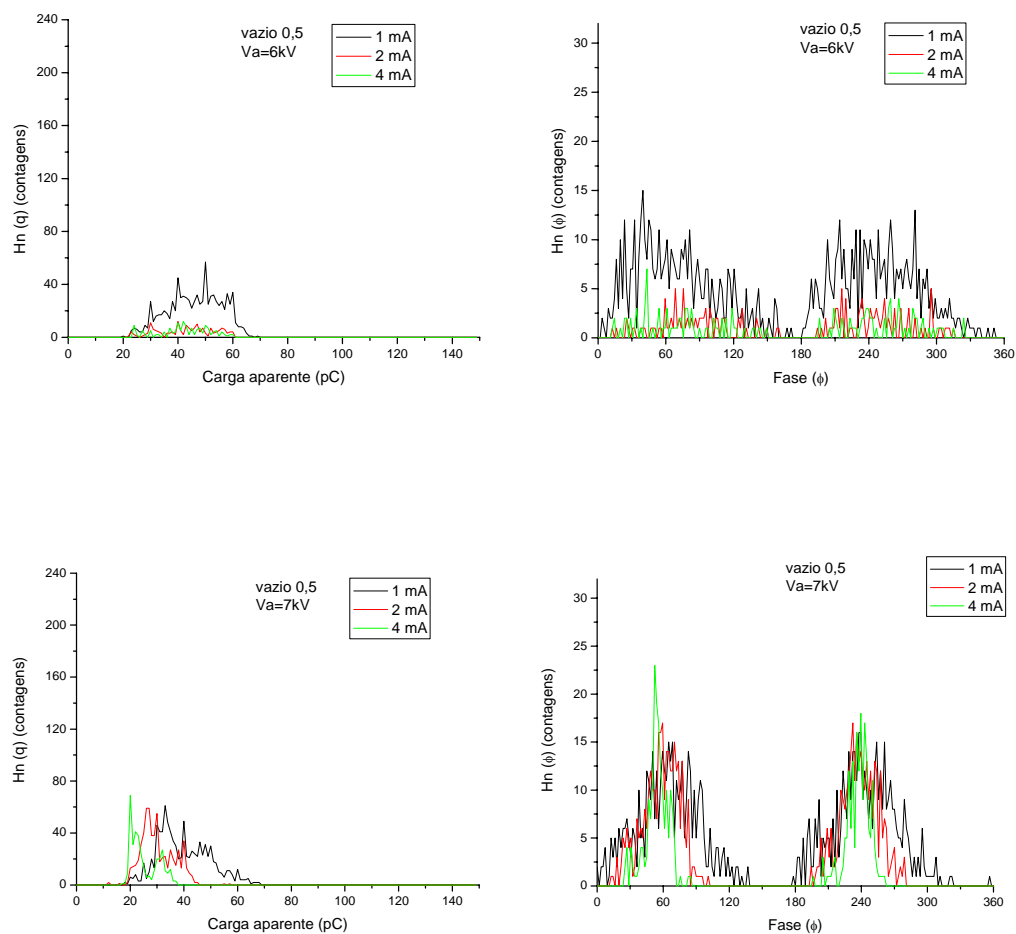


Figura 6.11. Amostra de polietileno, P5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

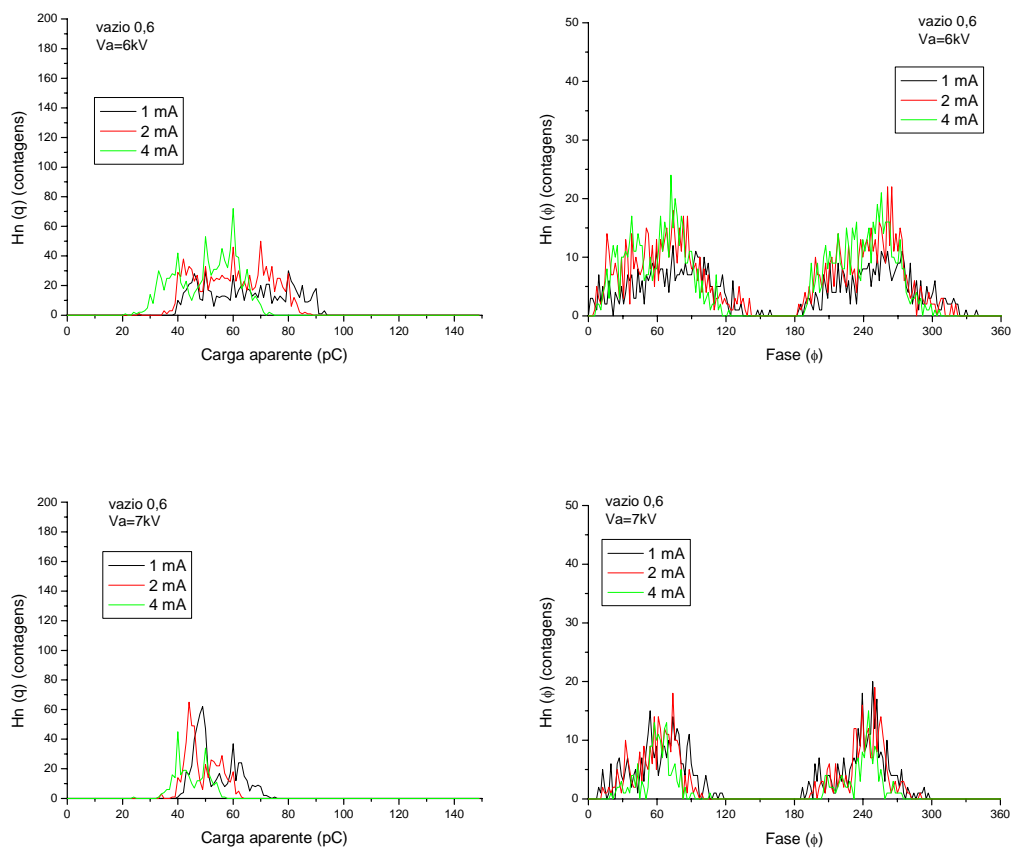


Figura 6.12. Amostra de polietileno, P6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

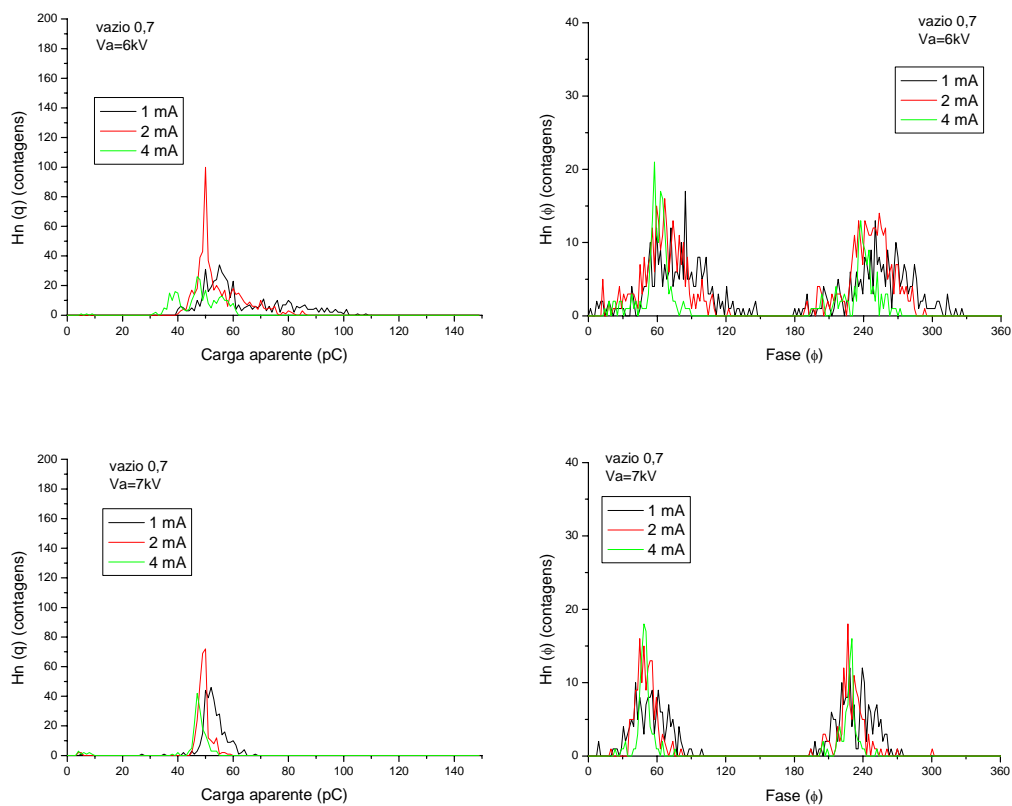


Figura 6.13. Amostra de polietileno, P7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

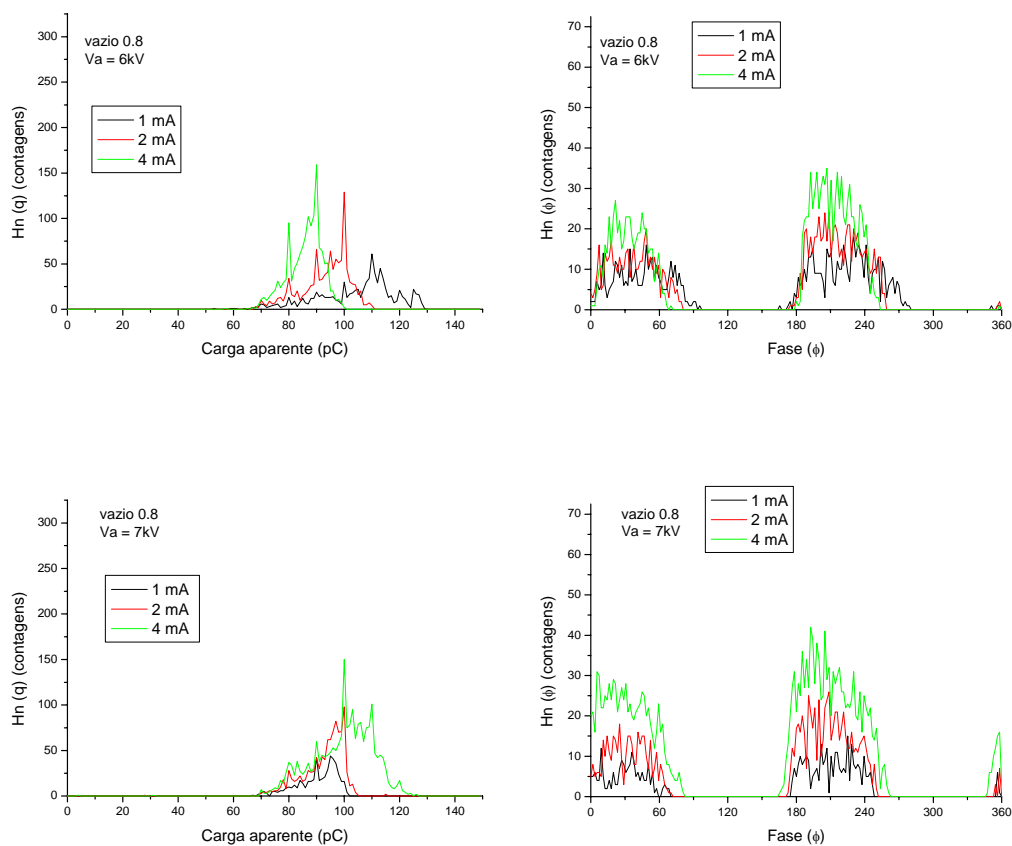


Figura 6.14. Amostra de polietileno, P8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

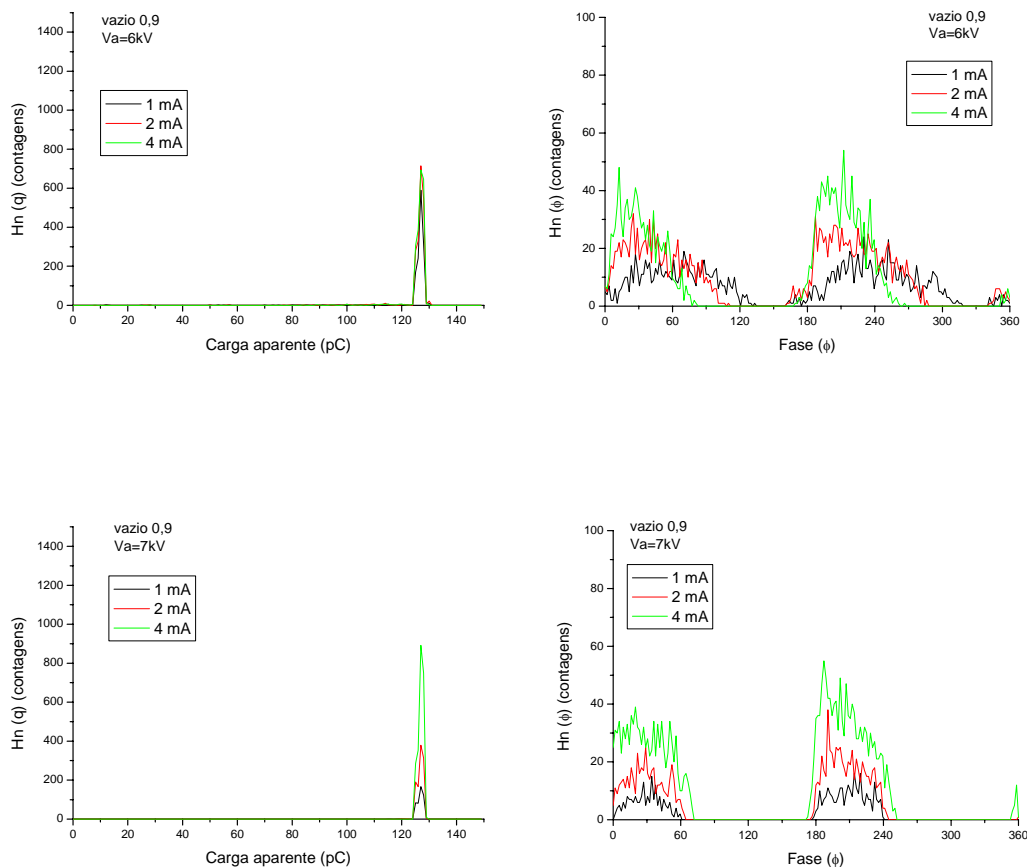


Figura 6.15. Amostra de polietileno, P9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV-1 mA, 2 mA e 4 mA).

Das distribuições obtidas uma primeira avaliação pode ser realizada. Para as amostras de epóxi temos que com o aumento da intensidade de raios-X, para a mesma tensão aplicada, aumenta o número de ocorrência de descargas, i.e., as distribuições passam a ter maior amplitude. Pode ser observado, analisando cada amostra individualmente, que as descargas tendem a se concentrar em torno de uma determinada faixa de ângulo de fase, ficando as distribuições mais estreitas e

assimétricas. As descargas ficam concentradas na faixa de ângulo de fase entre 25 e 40°. Este efeito é mais acentuado para os vazios de maior diâmetro quando irradiados com intensidade de raios-X de 4 mA. Ainda, com o aumento da tensão aplicada, para a mesma intensidade de raios-X, aumenta o número de ocorrência de descargas. Todavia, o efeito do aumento da tensão aplicada nas distribuições de ocorrência não é tão significativo quanto o efeito do aumento da intensidade de raios-X.

Para as amostras de polietileno é observado que, com o aumento da intensidade de raios-X, ocorre geralmente uma redução no número de ocorrência de descargas, exceto para as amostras P8 e P9. Apesar de não ser observada para as amostras P8 e P9 nas medidas com raios-X contínuo, a redução do número de ocorrências é visível durante a continuidade das medidas, i.e., durante as medidas com raios-X pulsado (vide item 6.2). Ainda, a faixa de concentração das descargas varia com o diâmetro do vazio e o efeito do aumento da tensão aplicada só teve influência significativa para as amostras com diâmetro inferior a 0,5 mm.

6.1.3. CARGA APARENTE TOTAL POR CICLO

Informações a respeito da magnitude da carga aparente transferida durante a atividade das descargas parciais podem ser conseguidas da distribuição $H_n(q)$. Para cada amostra testada, de epóxi e polietileno, dois parâmetros quantitativos foram obtidos a partir desta distribuição: (i) o valor de pico da carga aparente, que é equivalente a moda da distribuição $H_n(q)$ e (ii) a carga aparente total por ciclo. Vale ser observado que a distribuição $H_n(q)$ das amostras de polietileno não é tão bem

comportada quanto a distribuição $H_n(q)$ das amostras de epóxi. Por esta razão os valores de pico da carga aparente obtidos para as amostras de polietileno têm por base as medidas para intensidade de raios-X de 2 mA. Os valores de pico da carga aparente são ilustrados na tabela 6.2 e figura 6.16. Pode ser notado que a magnitude do pico da carga aparente possui relação direta com o diâmetro do vazio, i.e., quanto maior o diâmetro do vazio maior o valor de pico da carga aparente transferida durante a atividade de descargas parciais.

Tabela 6.2. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para as amostras de epóxi e de polietileno, raios-X contínuo	
EPÓXI	
Diâmetro (mm)	Pico da carga aparente (pC)
0,3	15
0,4	20
0,5	30
0,6	50
0,7	70
0,8	130 ^(*)
0,9	130 ^(*)
POLIETILENO	
0,3	12
0,4	20
0,5	30
0,6	40
0,7	50
0,8	100
0,9	130 ^(*)

(*) O valor registrado do pico de carga aparente está limitado pela capacidade do detector utilizado conforme descrito no capítulo 5, item 5.2.

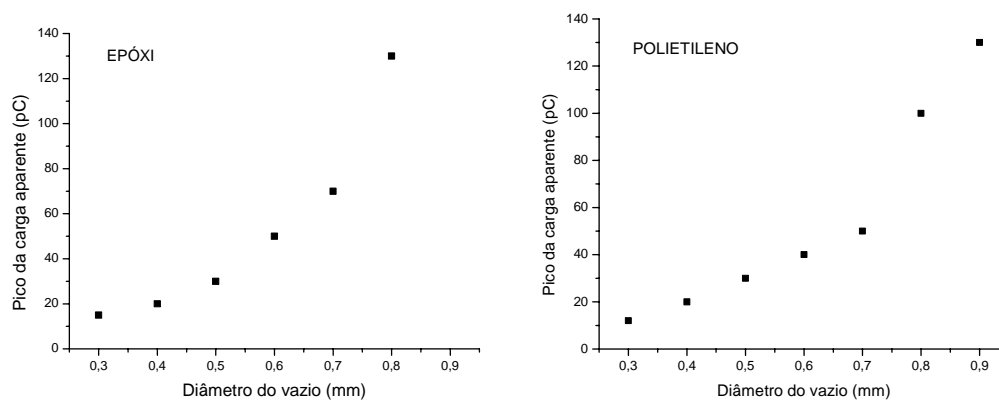
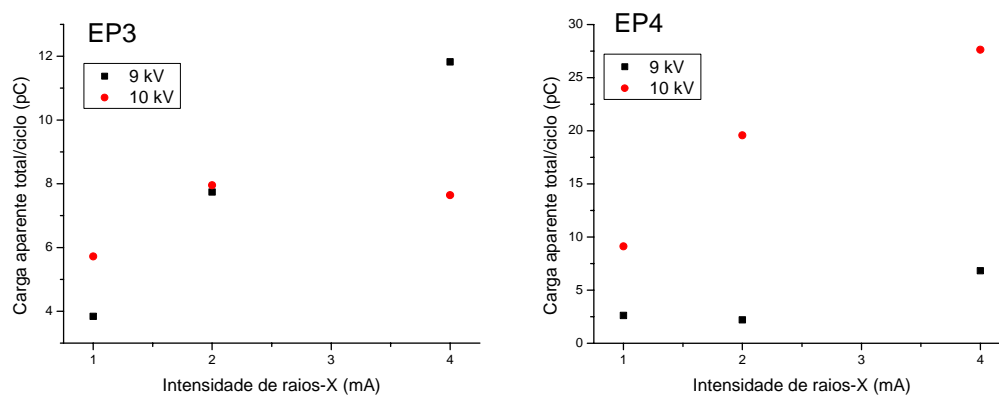


Figura 6.16. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para as amostras de epóxi e de polietileno.

As figuras 6.17 e 6.18 apresentam os valores calculados de carga aparente total por ciclo em função da tensão aplicada e intensidade de raios-X para as amostras de epóxi e polietileno.



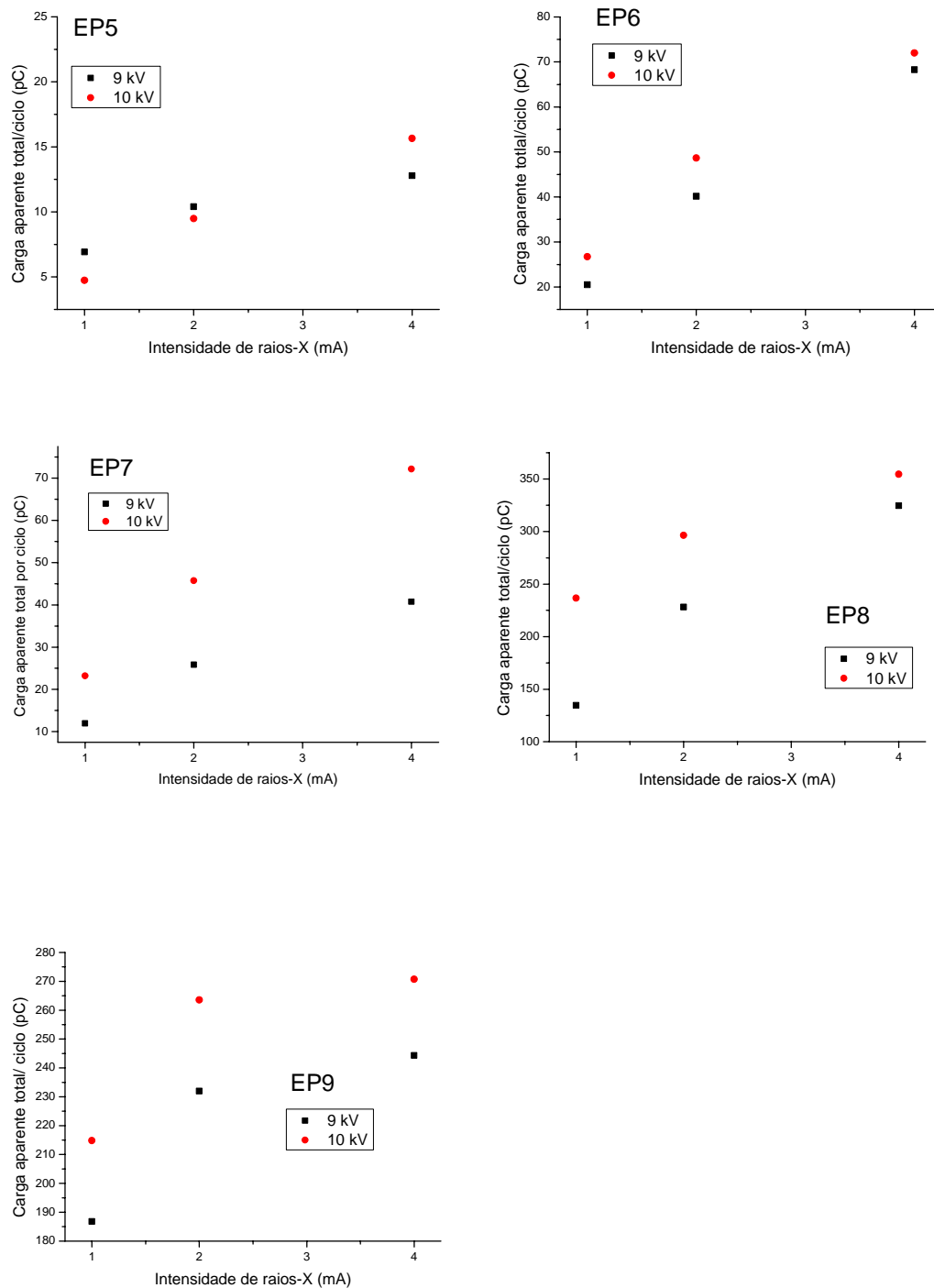
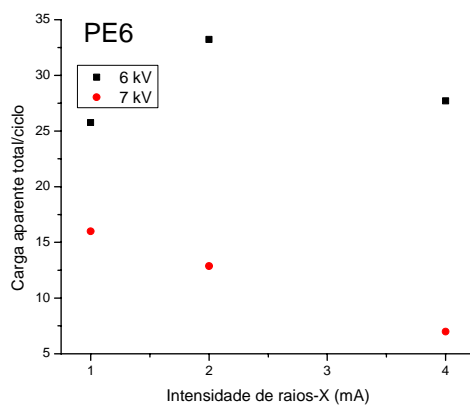
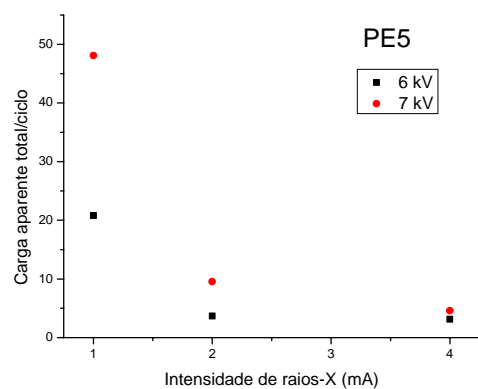
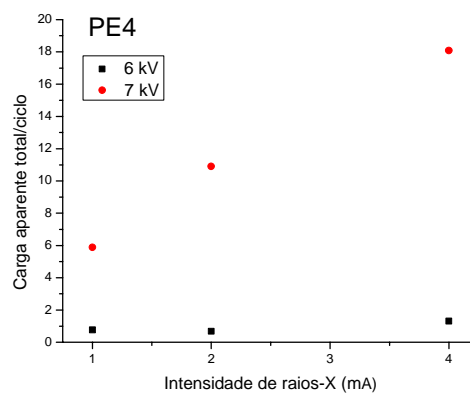
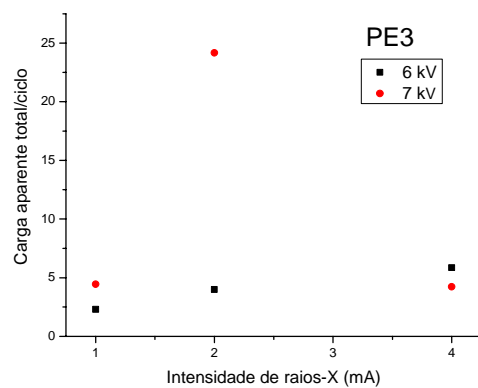


Figura 6.17. Carga aparente total por ciclo em função da intensidade de raios-X, tensão aplicada de 9 kV e 10 kV, para amostras de epóxi com vazios de diferentes diâmetros.



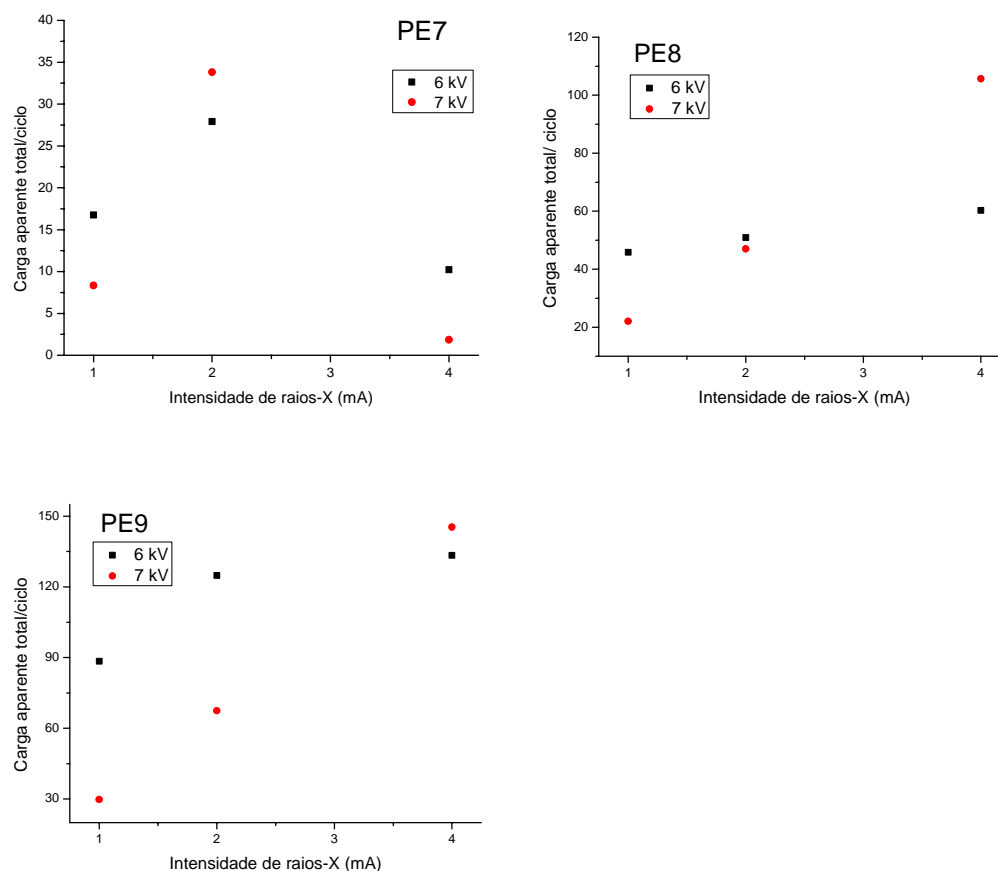


Figura 6.18. Carga aparente total por ciclo em função da intensidade de raios-X, tensão aplicada de 6 kV e 7 kV, para amostras de polietileno com vazios de diferentes diâmetros.

Para o epóxi (figura 6.17), analisando cada amostra individualmente, é notado que para a mesma tensão aplicada, quanto maior a intensidade de raios-X maior a carga aparente total por ciclo. Para o polietileno, com relação ao efeito da intensidade dos raios-X, as amostras P8 e P9 apresentaram resultado similar ao epóxi. Para as demais amostras houve redução da carga aparente total por ciclo com o aumento da intensidade de raios-X. Este resultado, em conjunto com a avaliação das distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ realizada anteriormente, permite estabelecer, para o epóxi, a seguinte

relação: quanto maior a intensidade de raios-X, maior a carga aparente total por ciclo e maior o número de ocorrências de descargas parciais. Tal assertiva não pode ser generalizada para as amostras de polietileno testadas. A mesma relação pode ser obtida para o epóxi quando analisamos o efeito do aumento da tensão aplicada, em cada amostra individualmente, para intensidade de raios-X constante.

6.1.4. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Das distribuições $H_n(\phi)$ foram calculados os seguintes parâmetros estatísticos: média, desvio padrão e assimetria, para os semiciclos positivo e negativo da tensão aplicada. As figuras de 6.19 a 6.28 apresentam os gráficos dos parâmetros estatísticos calculados, tanto em função do diâmetro do vazio quanto da intensidade de raios-X para as amostras de epóxi e polietileno.

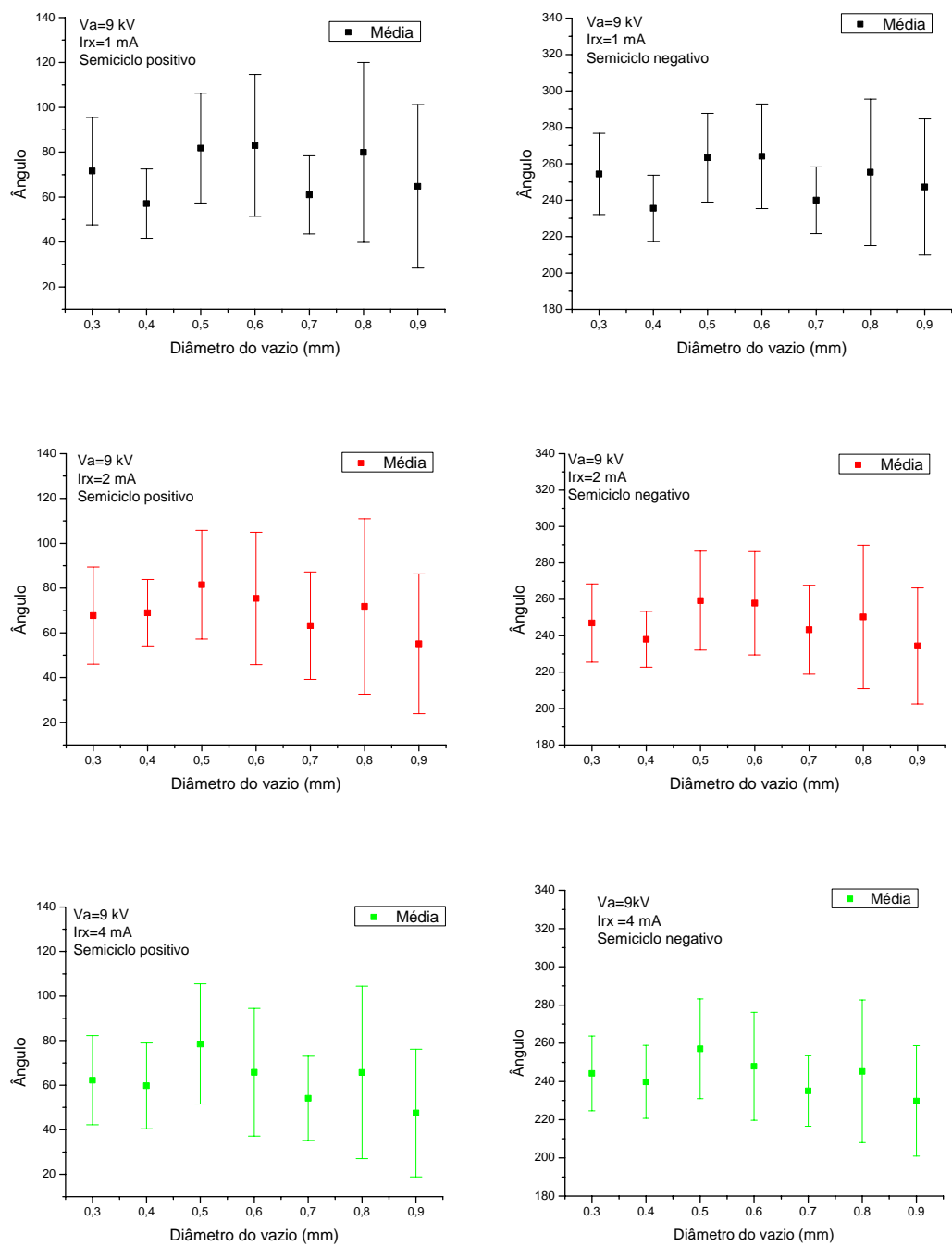


Figura 6.19. Epóxi - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 9 kV.

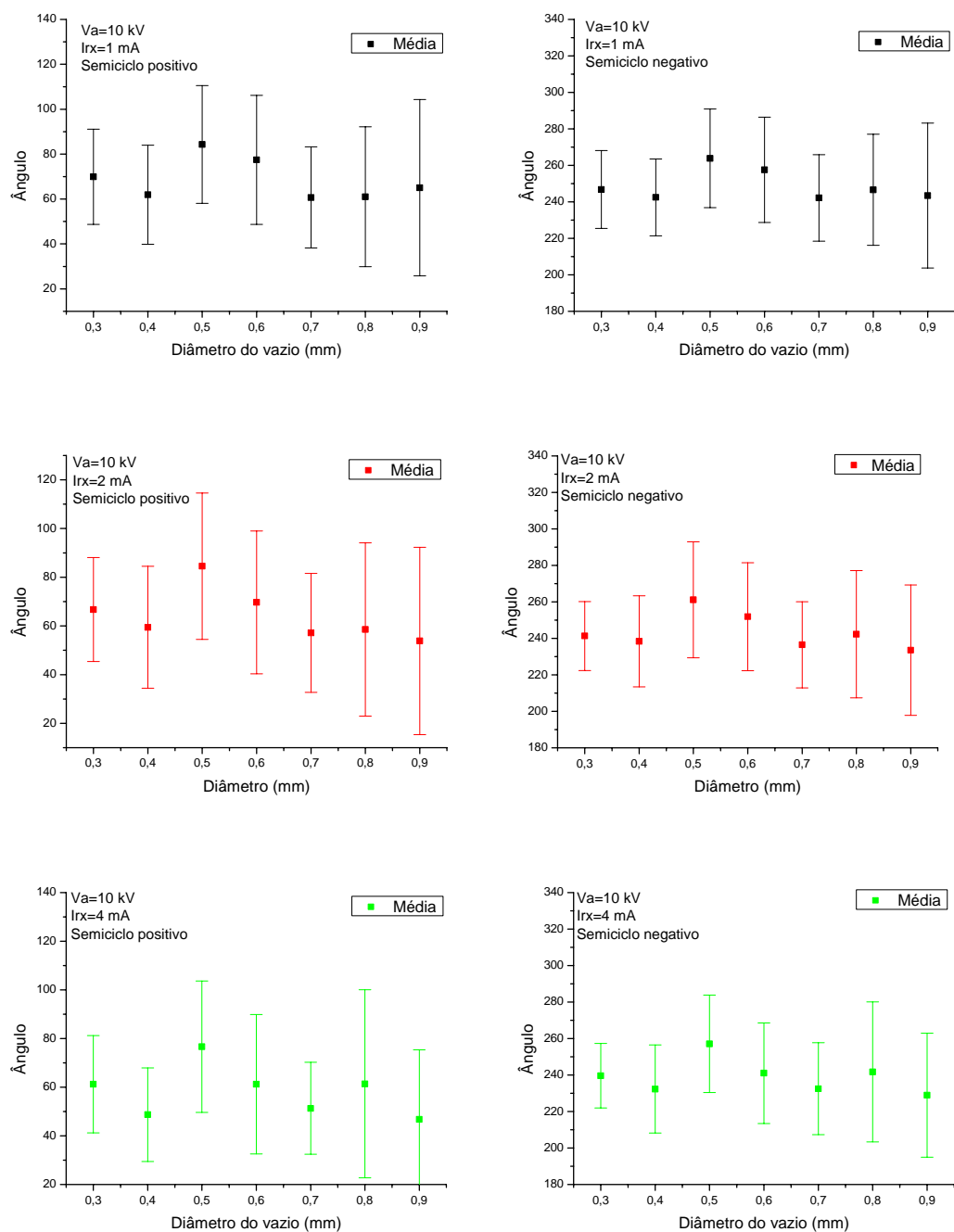


Figura 6.20. Epóxi - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 10 kV.

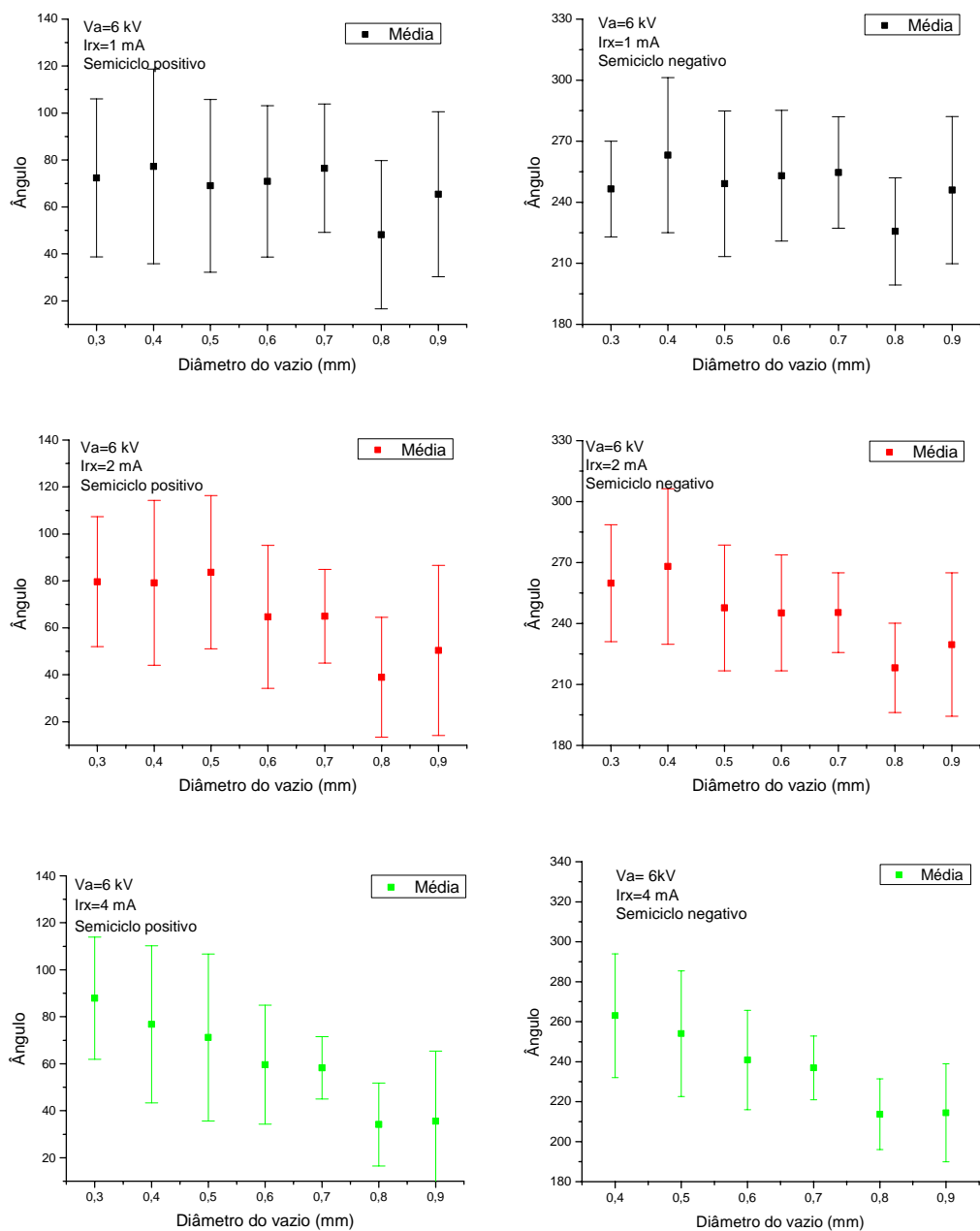


Figura 6.21. Polietileno - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 6 kV.

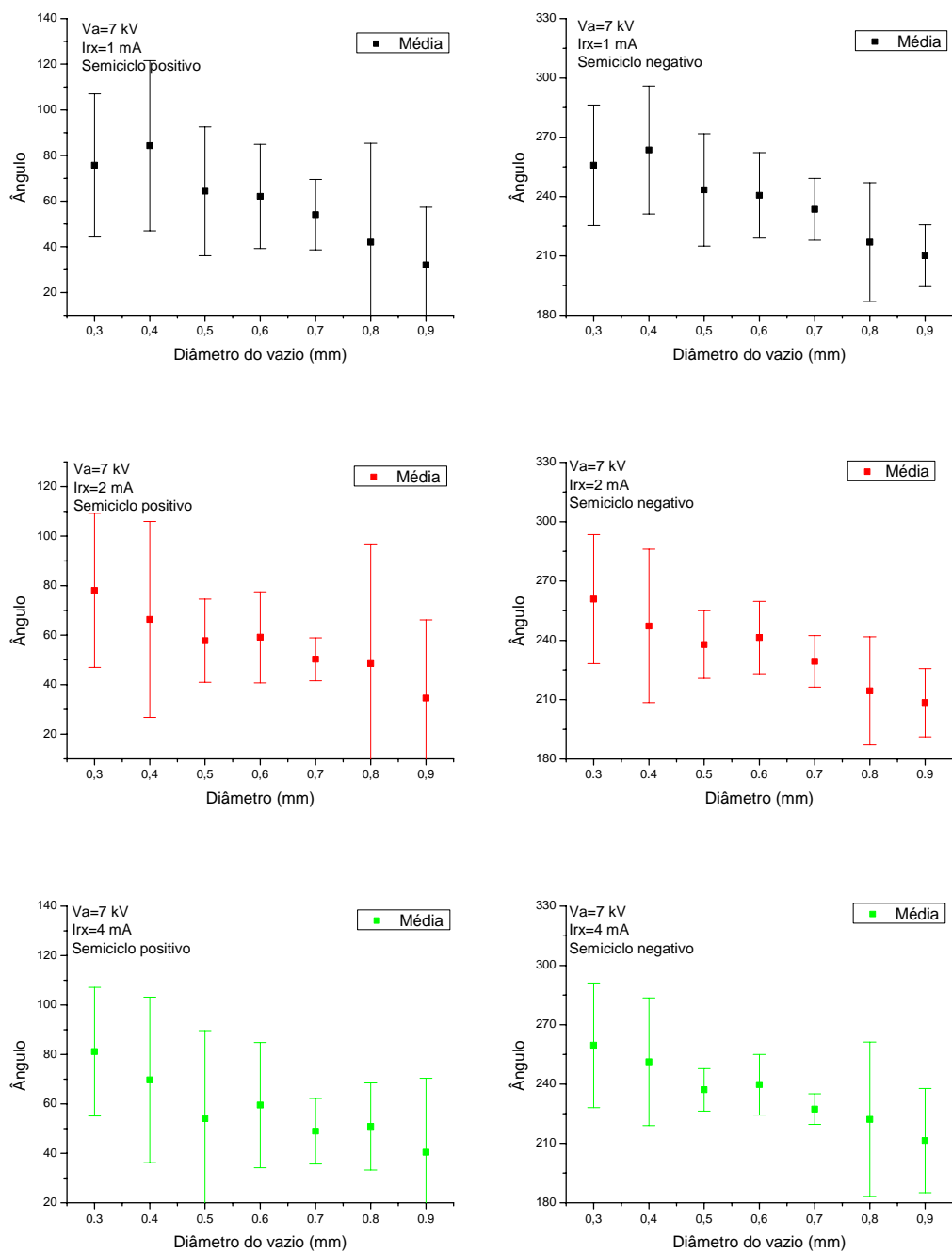
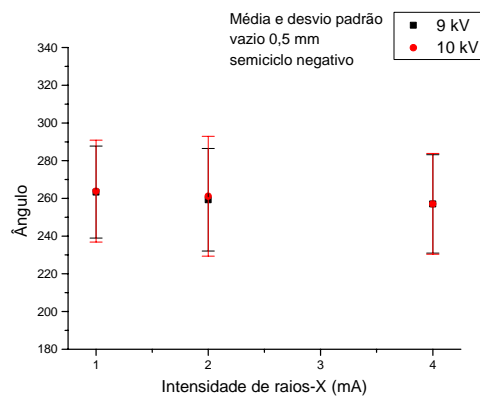
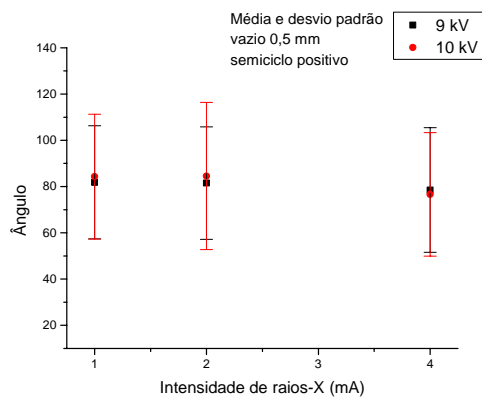
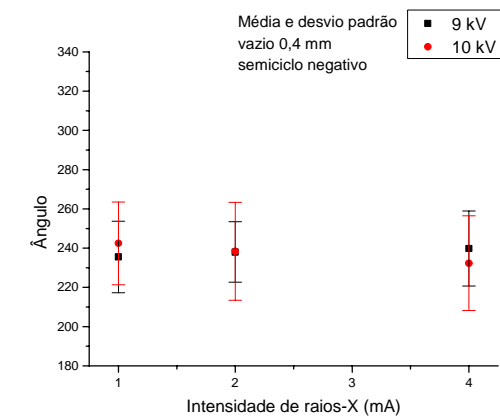
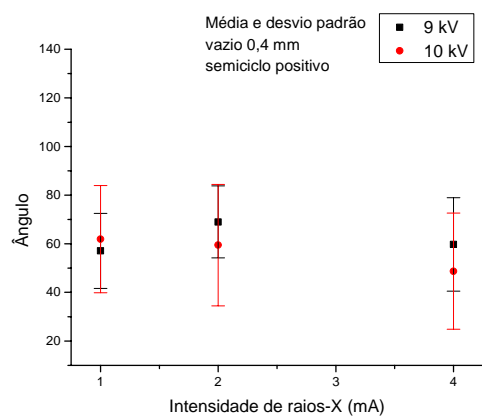
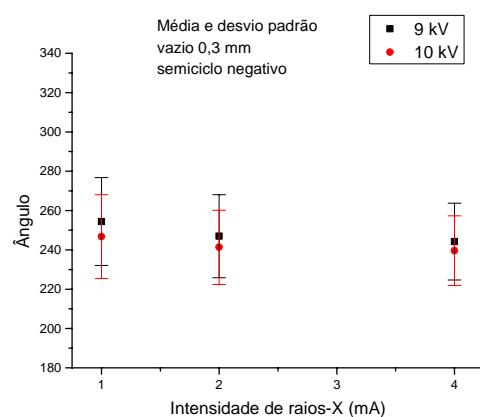
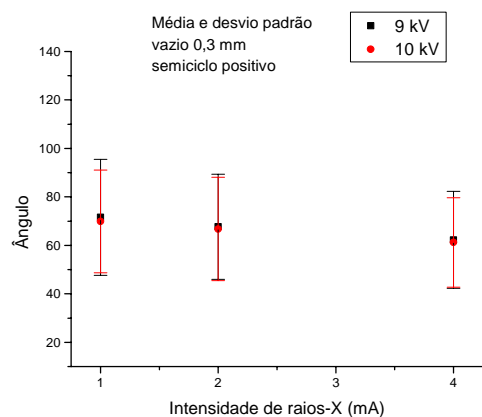
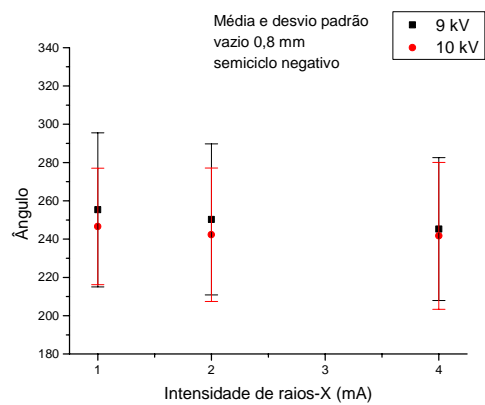
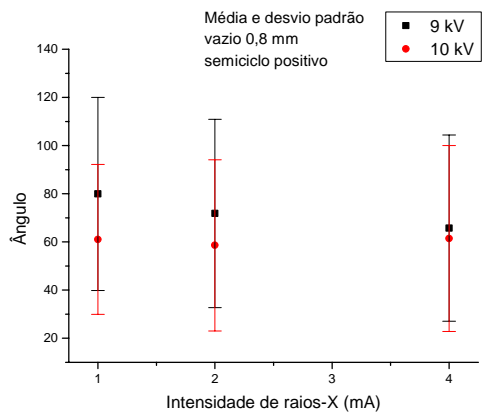
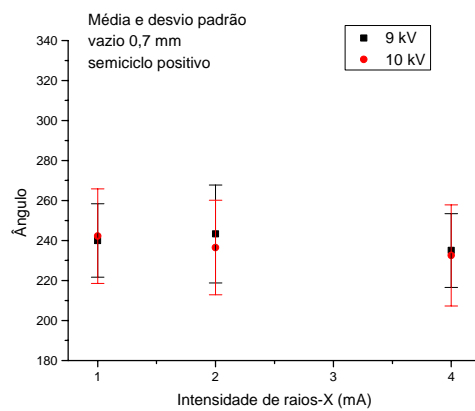
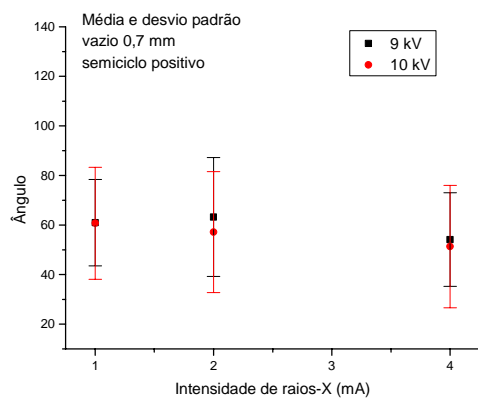
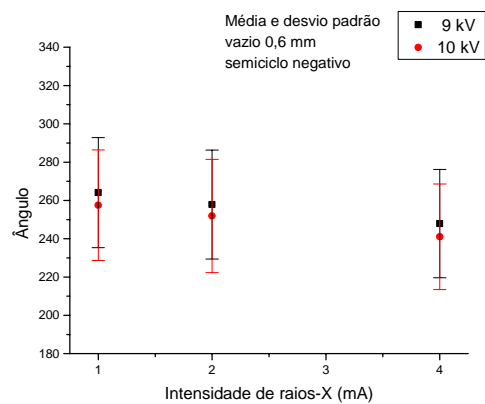
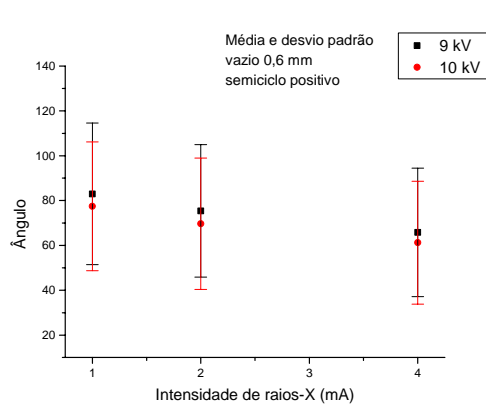


Figura 6.22. Polietileno - média e desvio padrão em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 7 kV.





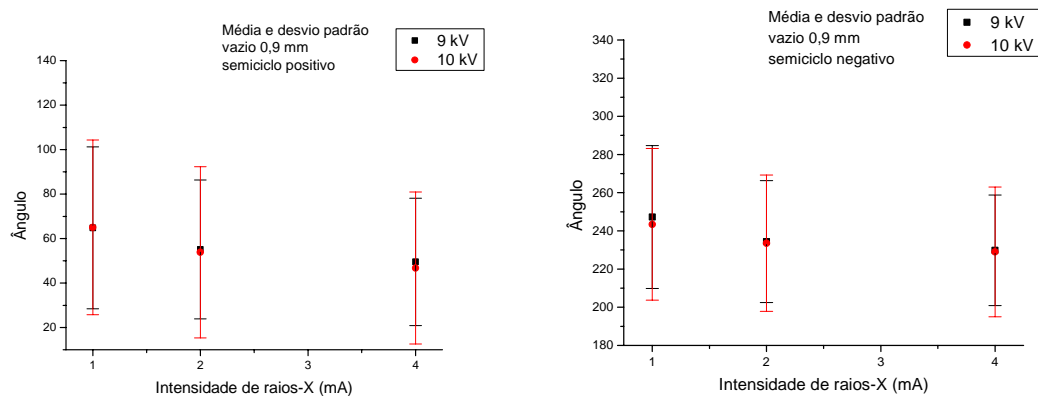
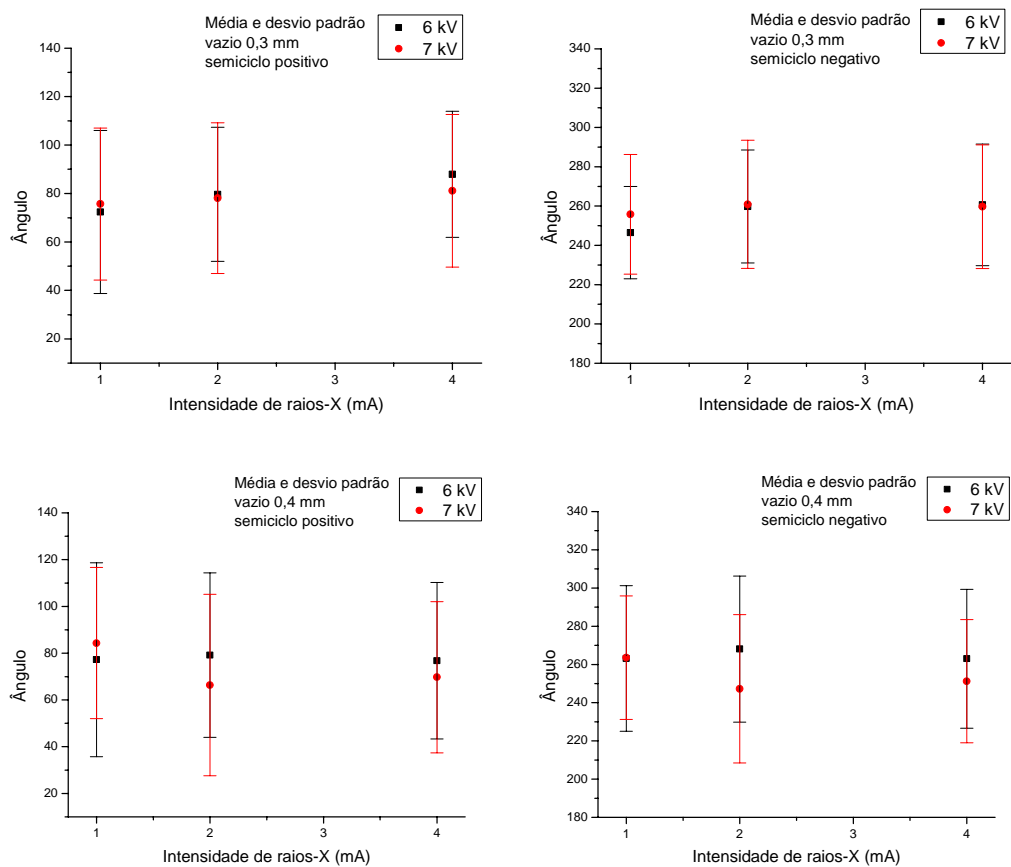
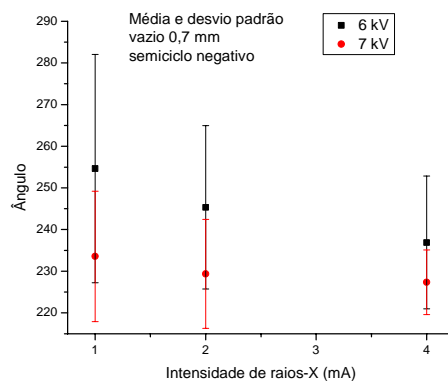
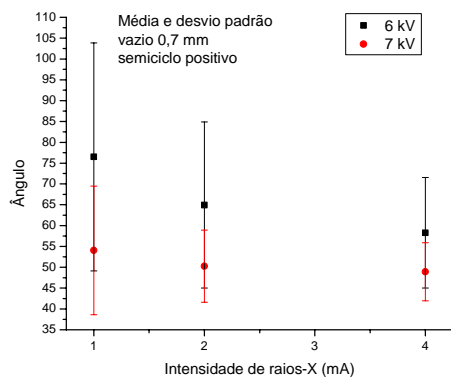
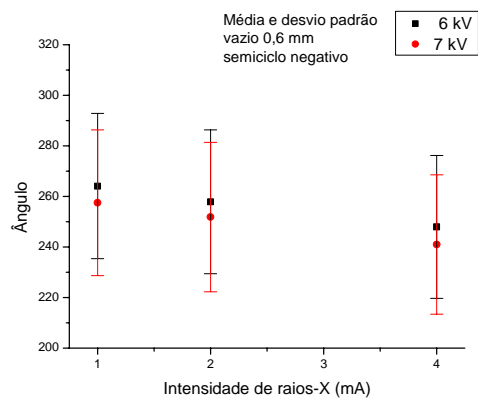
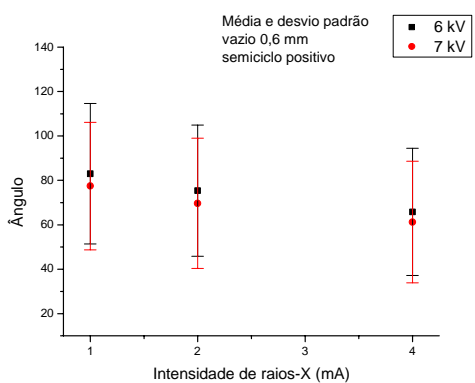
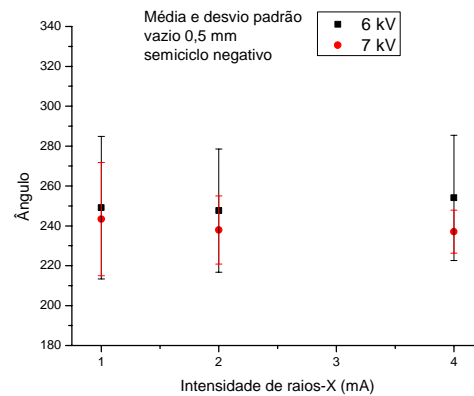
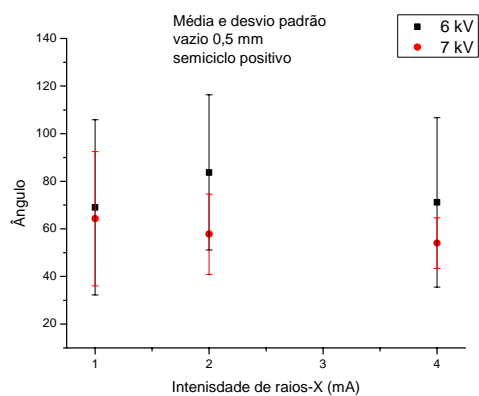


Figura 6.23. Epóxi - Média em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV.





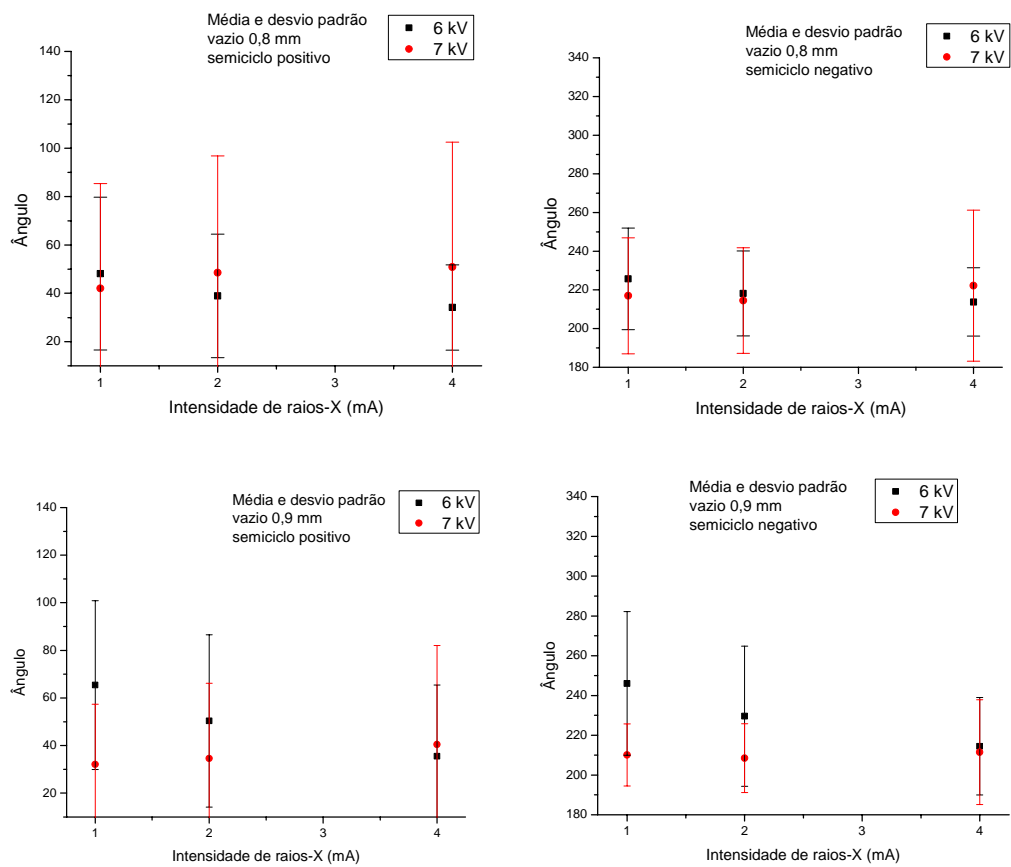


Figura 6.24. Polietileno - média em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV.

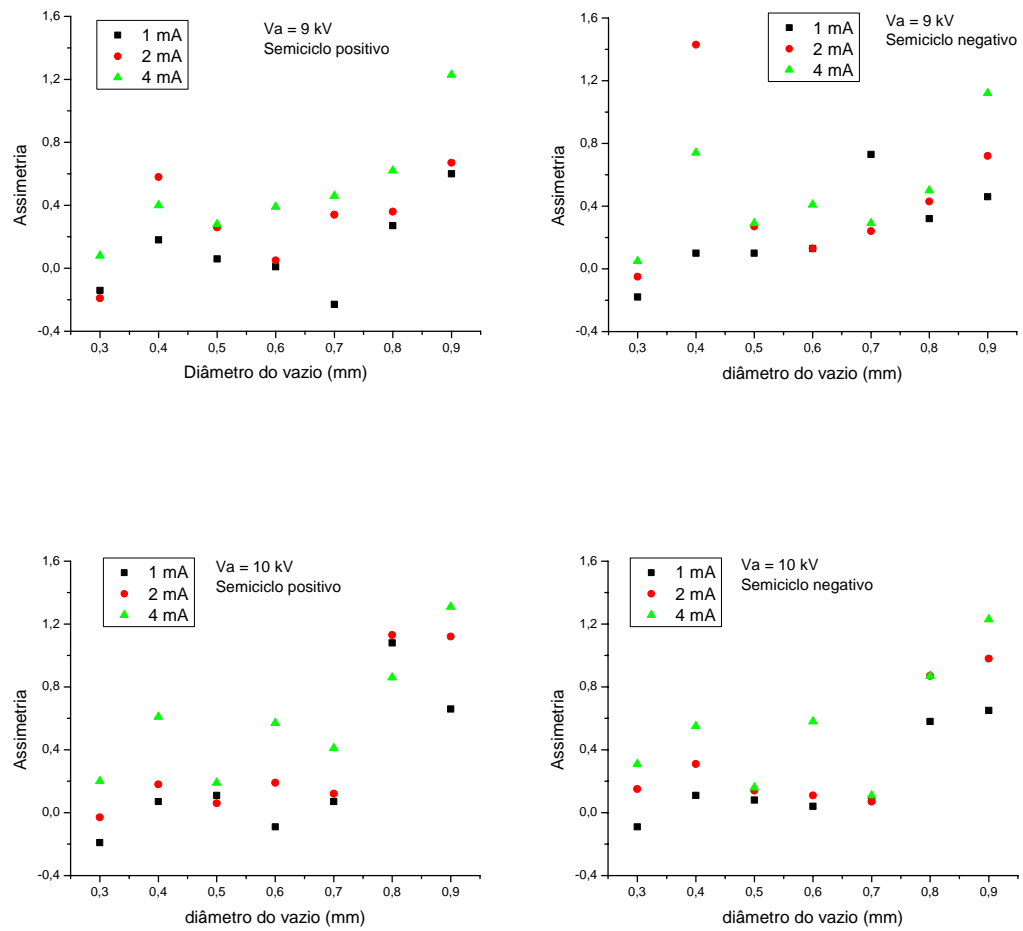


Figura 6.25. Epóxi - assimetria em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 9 kV e 10 kV.

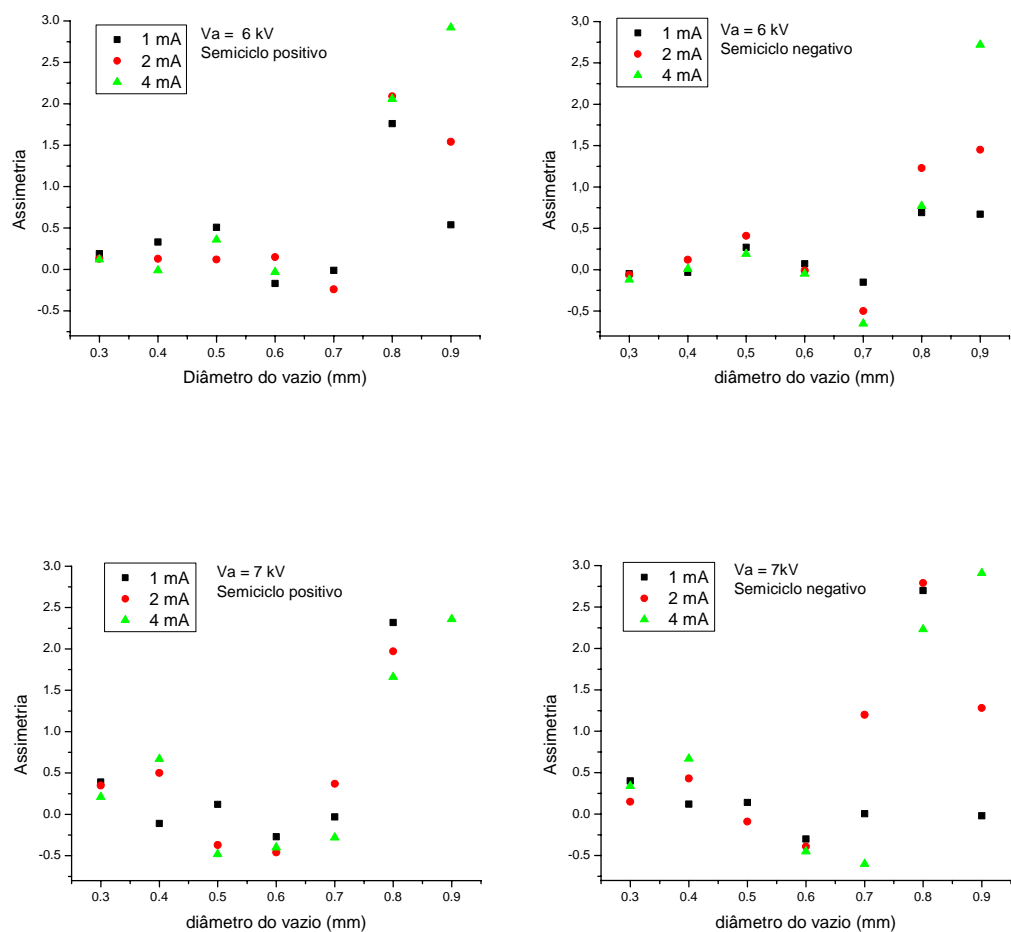
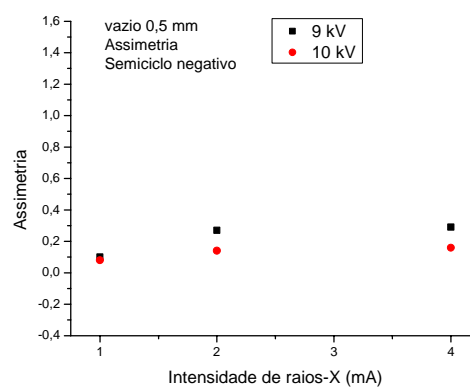
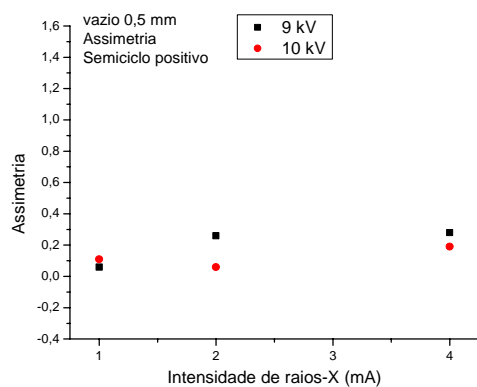
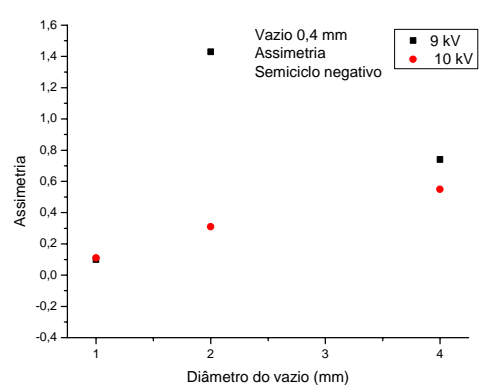
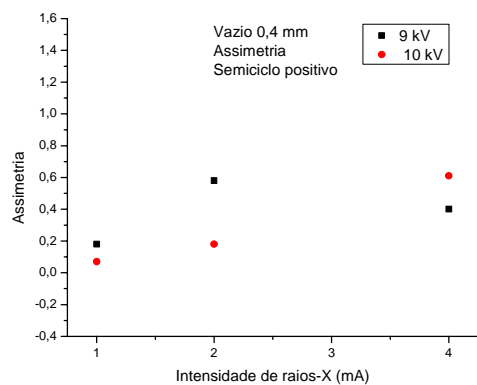
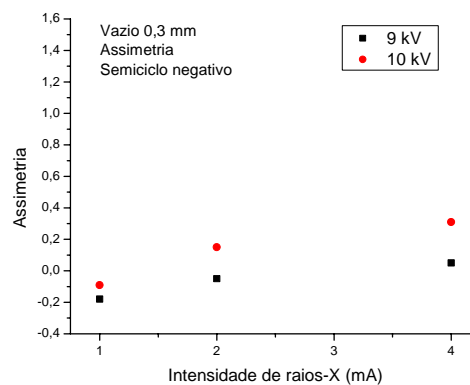
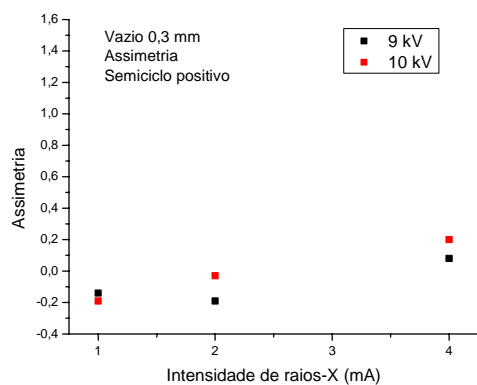
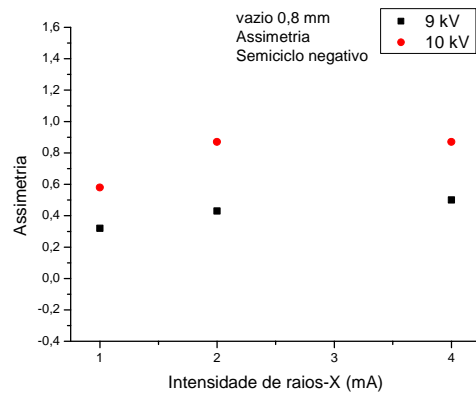
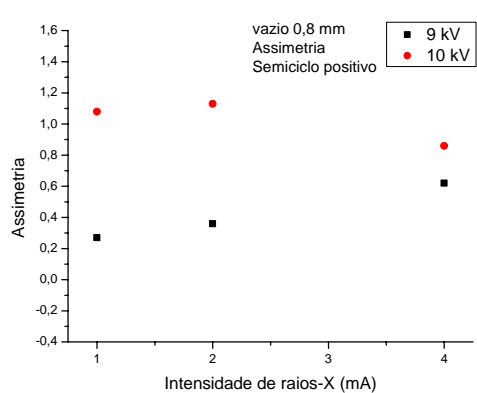
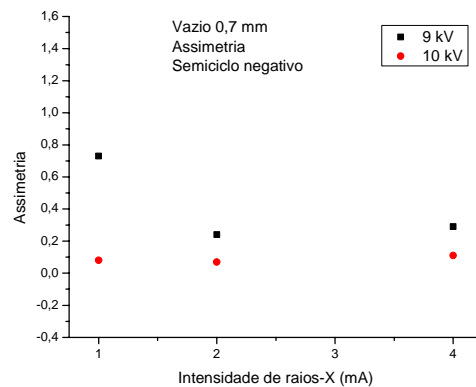
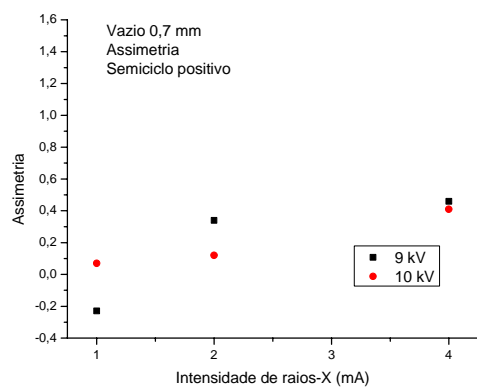
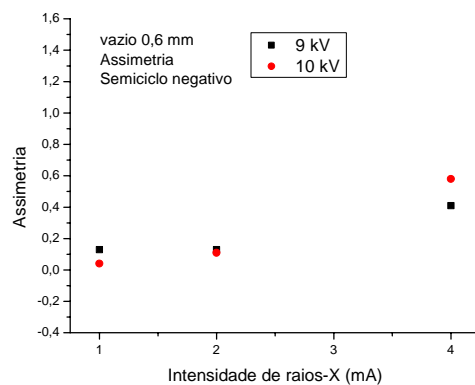
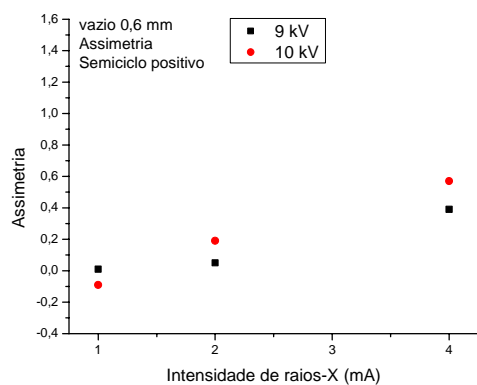


Figura 6.26. Polietileno - assimetria em função do diâmetro do vazio para distintas intensidades de raios-X e tensão aplicada de 6 kV e 7 kV.





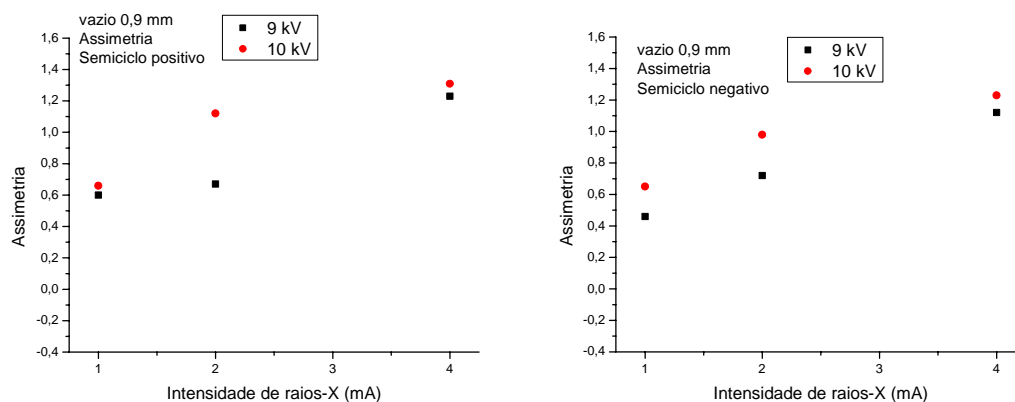
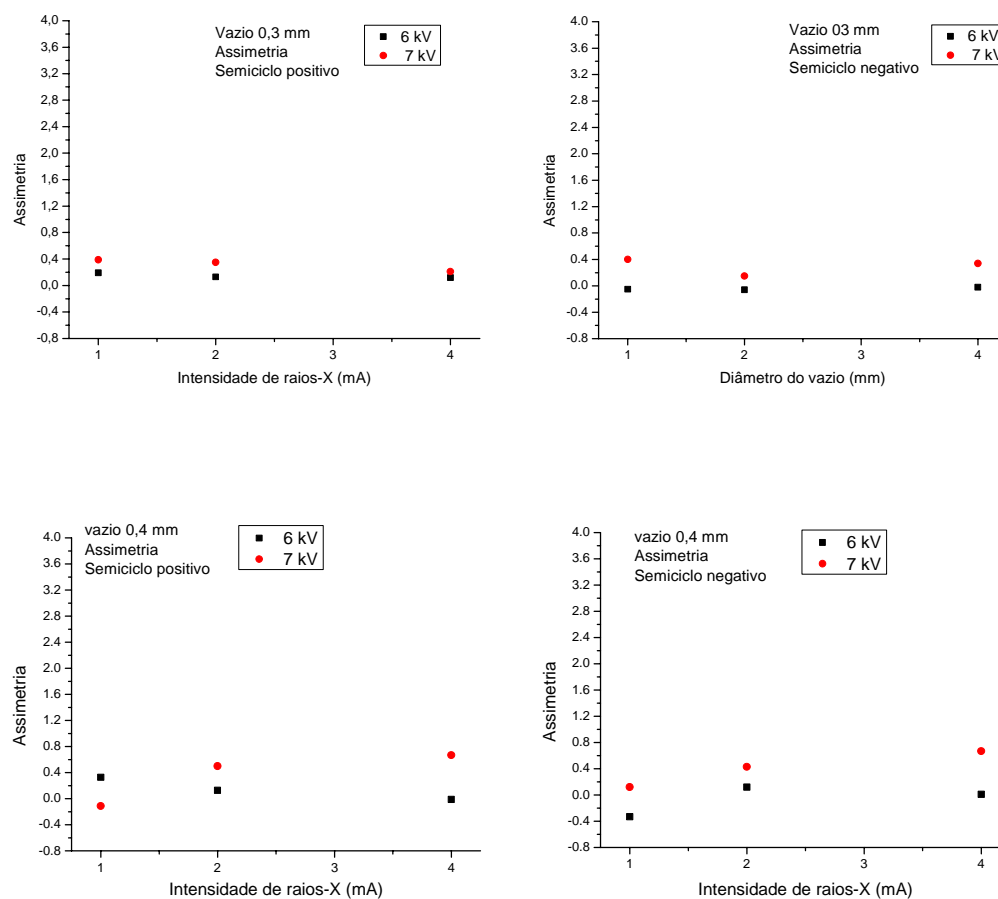
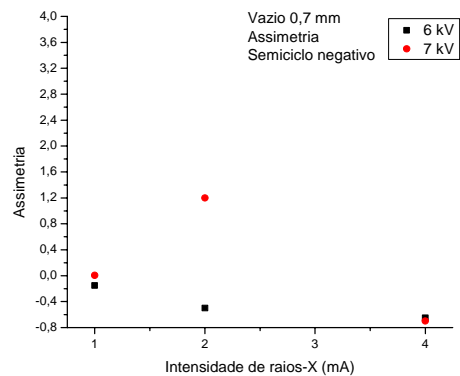
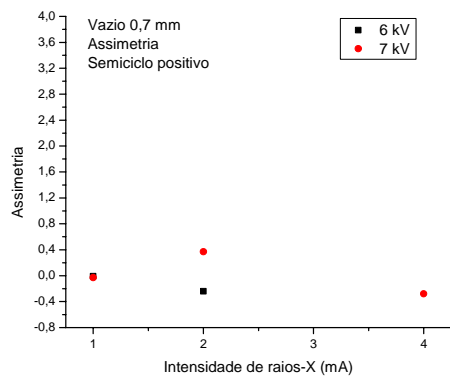
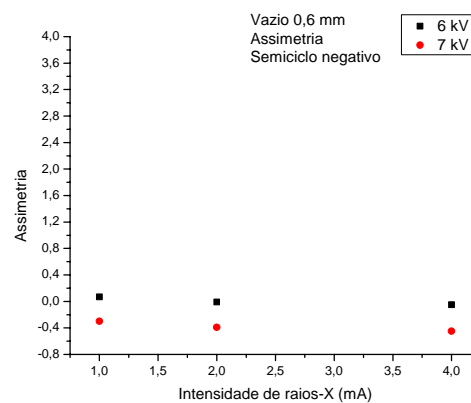
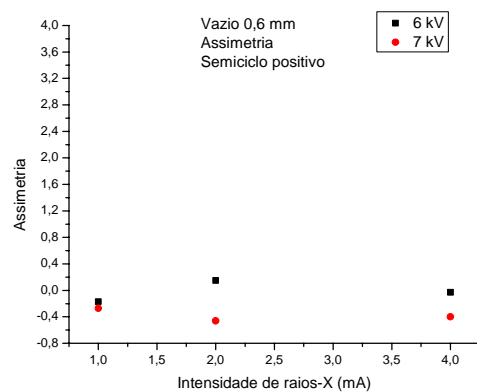
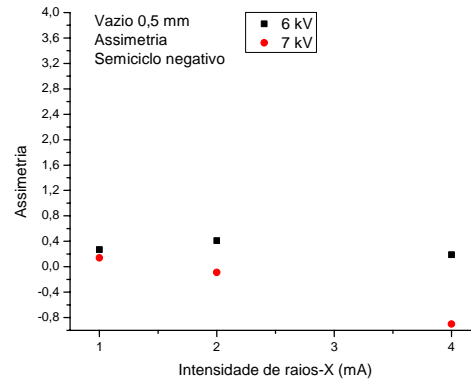
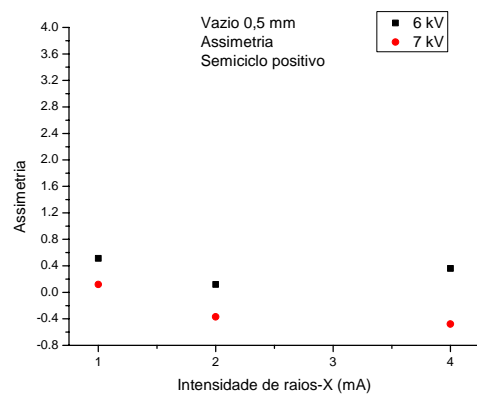


Figura 6.27. Epóxi - assimetria em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 9 kV e 10 kV.





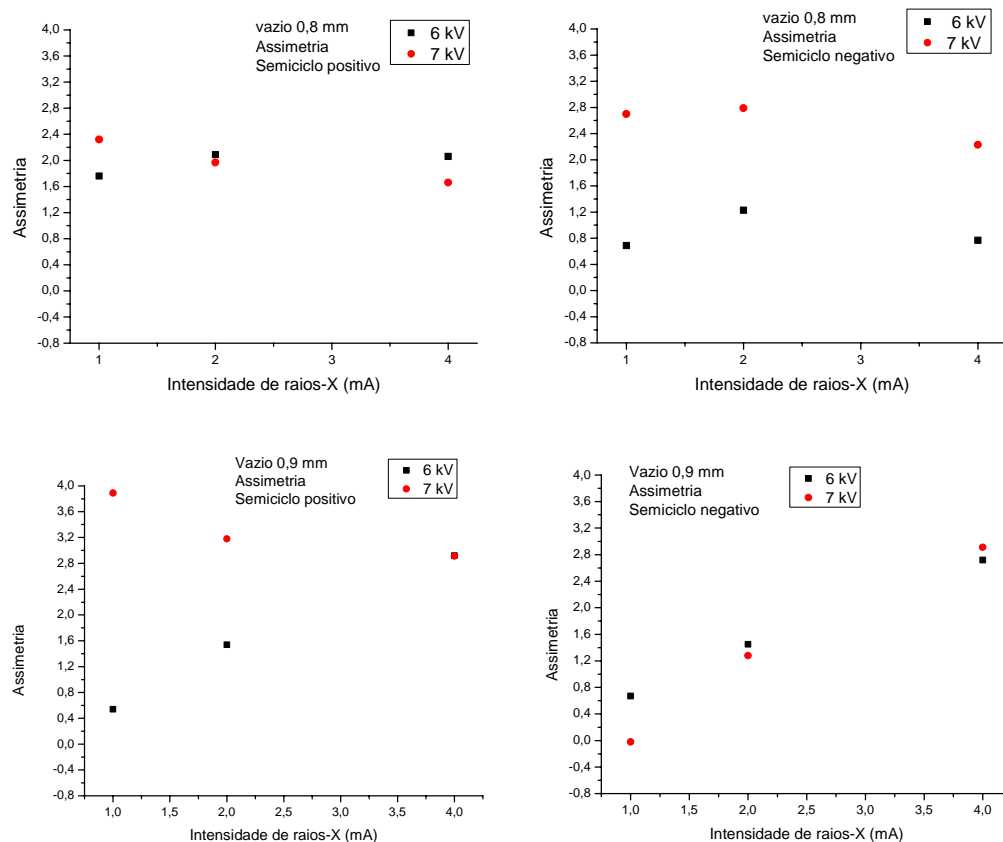


Figura 6.28. Polietileno - assimetria em função da intensidade dos raios-X para tensão aplicada de 6 kV e 7 kV.

Para as amostras de epóxi (figuras 6.19 e 6.20) nada podemos afirmar com relação ao parâmetro média devido à dispersão observada. Todavia, pode ser notado que a maior probabilidade de ocorrência de descargas está localizada na faixa de 50° a 90° no semiciclo positivo, 230° a 270° no semiciclo negativo e praticamente independe do diâmetro do vazio. Todavia, para as amostras de polietileno (figuras 6.21 e 6.22) há uma tendência da diminuição do parâmetro média com o aumento do diâmetro do vazio. Este resultado mostra que ocorre um deslocamento da atividade das descargas

para ângulos de fase menores à medida que aumenta o diâmetro do vazio. Das figuras 6.23 e 6.24 pode ser notado que o aumento da tensão aplicada tem um efeito pouco significativo sobre este parâmetro estatístico.

Das figuras 6.25 a 6.28 é observado que, geralmente, quanto maior o diâmetro do vazio maior a assimetria da distribuição $H_n(\phi)$. Desta forma, o parâmetro assimetria vem a confirmar de forma quantitativa que à medida que aumenta o diâmetro do vazio as distribuições tendem a ficarem concentradas em torno de uma determinada faixa de ângulo de fase, sendo esta faixa mais estreita para vazios com diâmetro maior. Considerando cada amostra de epóxi individualmente (figuras 6.25 e 6.27), pode ser notado que, normalmente, quanto maior a intensidade de raios-X e a tensão aplicada, maior a assimetria da distribuição. Tal generalização não é válida para as amostras de polietileno (figuras 6.26 e 6.28).

Dos resultados e discussões prévias algumas considerações podem ser feitas com relação ao comportamento das descargas parciais, em amostras de epóxi e de polietileno, quando estimuladas com raios-X contínuo. É conhecido que para a ocorrência de descargas parciais em vazios, duas condições devem ser satisfeitas, a saber, (i) o campo local deve exceder um valor mínimo e (ii) deve haver a presença de um elétron inicial disponível no vazio para iniciar a avalanche eletrônica. Nas medidas realizadas nas amostras de epóxi foi observado que, sem irradiação com raios-X, não houve a ocorrência de descargas parciais em nenhuma das amostras testadas quando da aplicação da máxima tensão de teste permitida pelo arranjo experimental. Por outro lado, nas amostras de polietileno não-irradiadas ocorrências de descargas parciais

foram observadas na tensão de 10 kV. Todavia, quando as amostras, tanto de epóxi quanto de polietileno, foram submetidas simultaneamente a uma tensão elétrica muito inferior ao máximo permitido pelo arranjo experimental e raios-X contínuo descargas parciais internas foram ativadas quase que instantaneamente. Desta consideração pode ser constatado que, quando da irradiação com raios-X, o tempo estatístico de atraso e a tensão de início são reduzidos. Para o polietileno a tensão de início foi reduzida em aproximadamente 40% quando as amostras foram irradiadas com raios-X. Esta redução pode chegar a 75% no caso do epóxi [BRAUN, 1991]. Ainda, uma vez que o campo aplicado durante as medidas com raios-X contínuo é bastante pequeno, podemos dizer que o mecanismo responsável pela geração dos elétrons iniciais é a fotoionização. O processo de emissão por campo constitui, neste caso, um mecanismo secundário.

Para as amostras de epóxi foi observado que, em geral, com o aumento da intensidade dos raios-X e da tensão aplicada ocorre um aumento do número de ocorrência de descargas, sendo este efeito menos significativo no caso do aumento da tensão aplicada. Este aumento do número de ocorrências é confirmado pelos valores calculados de carga aparente total por ciclo. Isto ocorre porque quanto maior o número de fótons fornecidos ao vazio (i.e. maior intensidade de raios-X) maior a probabilidade de ionização do gás no interior do vazio. Com isto, ocorre um aumento na geração de elétrons iniciais no vazio e, conseqüentemente, aumenta o número de ocorrência de descargas. A redução do tempo estatístico de atraso também pode ser explicada pelo aumento na geração de elétrons iniciais via fótons induzidos por raios-X.

No caso das amostras de polietileno o número de ocorrências e a carga aparente total por ciclo foram reduzidos com o aumento da intensidade de raios-X. Sugere-se que tal fato seja devido à formação de camada condutiva na superfície do vazio decorrente de processo de oxidação, o qual seria responsável pela supressão das descargas [TANAKA, 1986, KIM, 2004].

A fim de investigar o fenômeno de supressão das descargas no polietileno foi tomada a amostra P7 e realizada a seguinte seqüência de medidas: medida 1 - vazio virgem, medida 2 – 48 h após medida 1, medida 3 – realizada logo após a medida 2 e medida 4 – 24 h após medida 3. Os resultados estão ilustrados na figura 6.29 e podem ser analisados da seguinte forma:

Medida 1 – vazio virgem: a tensão de início observada, quando irradiada com raios-X (35 kV – 1 mA) foi de 5,1 kV e o maior número de contagens está em 75 ocorrências para intensidade de raios-X de 2 mA. Para intensidade de raios-X de 4 mA ocorre já uma diminuição do número de ocorrências.

Medida 2 – 48 h após medida 1: a tensão de início observada continua 5,1 kV, porém o maior número de contagens está em 55 ocorrências para intensidade de raios-X de 2 mA. Para intensidade de raios-X de 4 mA ocorre uma diminuição do número de ocorrências. Comparando as medidas 1 e 2 observa-se que houve diminuição do maior número de ocorrências.

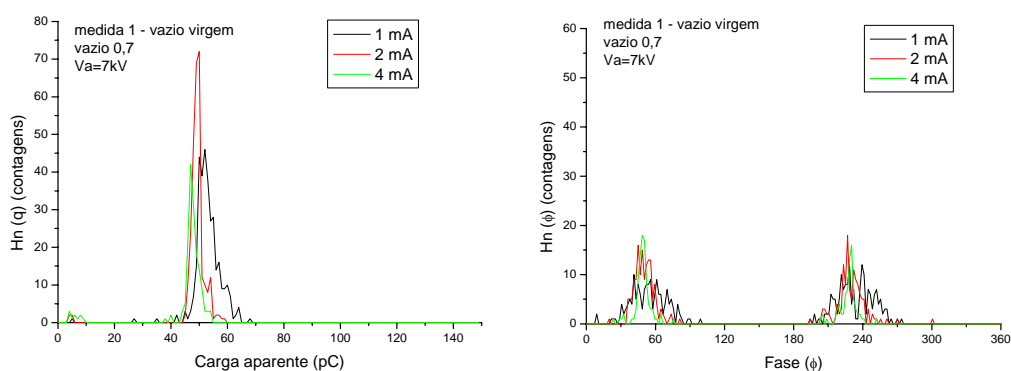
Medida 3 – realizada na seqüência da medida 2: Não houve período de descanso para a amostra. A tensão de início subiu para 6,8 kV, o maior número de ocorrências é de 35 para intensidade de raios-X de 2 mA e ocorre uma redução muito

brusca do número de ocorrências para intensidade de raios-X de 4 mA. Quase não há ocorrência de descargas para intensidade de raios-X de 4 mA.

Medida 4 – 24 h após medida 3: a tensão de início retorna para 5,1 kV. O comportamento observado é similar ao obtido na medida 3.

Em todas medidas é observado que o padrão das distribuições é mantido, i.e., as medidas ocorrem na mesma faixa de carga aparente e na mesma faixa de ângulo de fase.

Dois efeitos são indicativos claros da supressão da ocorrência das descargas, seja por alterações químicas no dielétrico quanto no gás, os quais são: (i) o aumento da tensão de início entre as medidas 2 e 3 e (ii) a diminuição do número de ocorrências de descargas, tanto durante o decorrer de uma mesma medida (para intensidade de raios-X de 4 mA) quanto entre uma medida e outra.



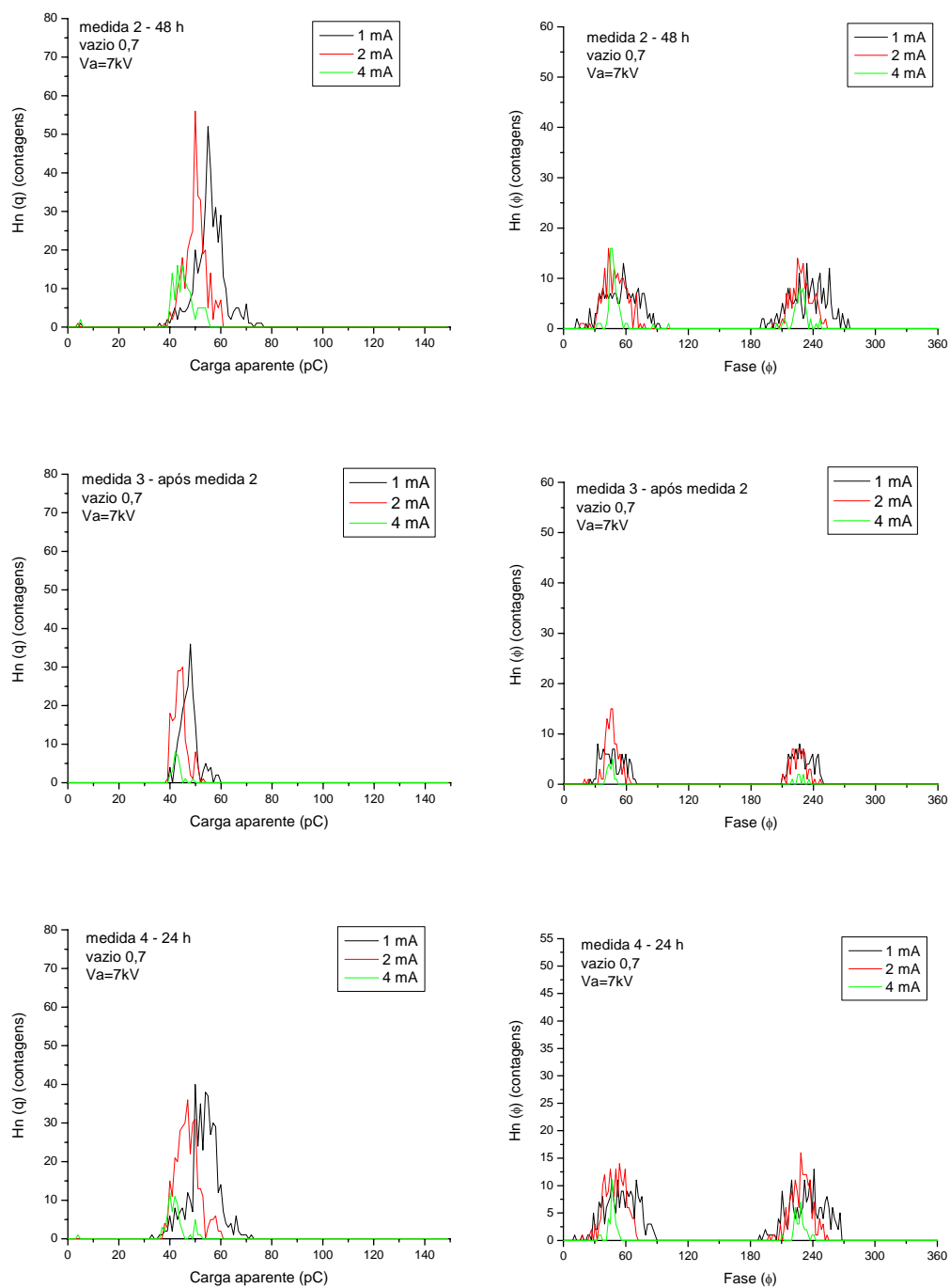


Figura 6.29. Investigação do fenômeno da supressão das descargas no polietileno: medida 1 – vazio virgem, medida 2 – 48 h, medida 3 – após medida 2, medida 4 – 24 h.

Para as amostras de epóxi foi comprovado quantitativamente que à medida que aumenta a intensidade do feixe de raios-X as descargas passam a se concentrar em torno de uma determinada faixa de ângulo de fase, tornando-se mais assimétricas. Tal assertiva não pode ser generalizada para as amostras de polietileno.

Há de se ressaltar ainda o efeito do diâmetro dos vazios nas distribuições e parâmetros calculados. Tanto para o epóxi quanto para o polietileno temos geralmente que vazios com diâmetro maior apresentam maior carga aparente transferida durante a atividade das descargas e distribuições com maior assimetria. Maior assimetria significa descargas concentradas em um ângulo de fase menor, i.e., as descargas ocorrem em um ponto da senóide onde a tensão aplicada é menor. Por sua vez, vazios maiores possuem menor tensão de início (vide item 6.1). Desta forma, assimetria, diâmetro do vazio e tensão de início estão relacionados, explicando assim o comportamento observado do aumento da assimetria com o aumento do diâmetro do vazio.

Ainda, o fato das distribuições obtidas para as amostras de epóxi se apresentarem bem comportadas com relação às distribuições obtidas para as amostras de polietileno pode estar relacionado a alterações na estrutura química dos materiais devido à ação das descargas parciais.

6.2. DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X PULSADO

6.2.1. DISTRIBUIÇÕES $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$

As medidas com raios-X pulsado foram realizadas com o maior valor da tensão aplicada nas medidas com raios-X contínuo. O valor da tensão de início, observado experimentalmente, é maior para raios-X pulsado. Isto ocorre porque a quantidade de elétrons iniciais gerados por este tipo de irradiação é menor, uma vez que o tempo de exposição do feixe de raios-X ao vazio é limitado pelo ângulo de abertura da janela do *chopper*. Durante as medidas as amostras ficam expostas à irradiação com raios-X contínuo durante aproximadamente 35 segundos, enquanto nas medidas com raios-X pulsado este tempo de exposição é de apenas 2 segundos.

As figuras de 6.30 a 6.43 apresentam as distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para as amostras de epóxi e de polietileno, quando sob irradiação de raios-X pulsado.

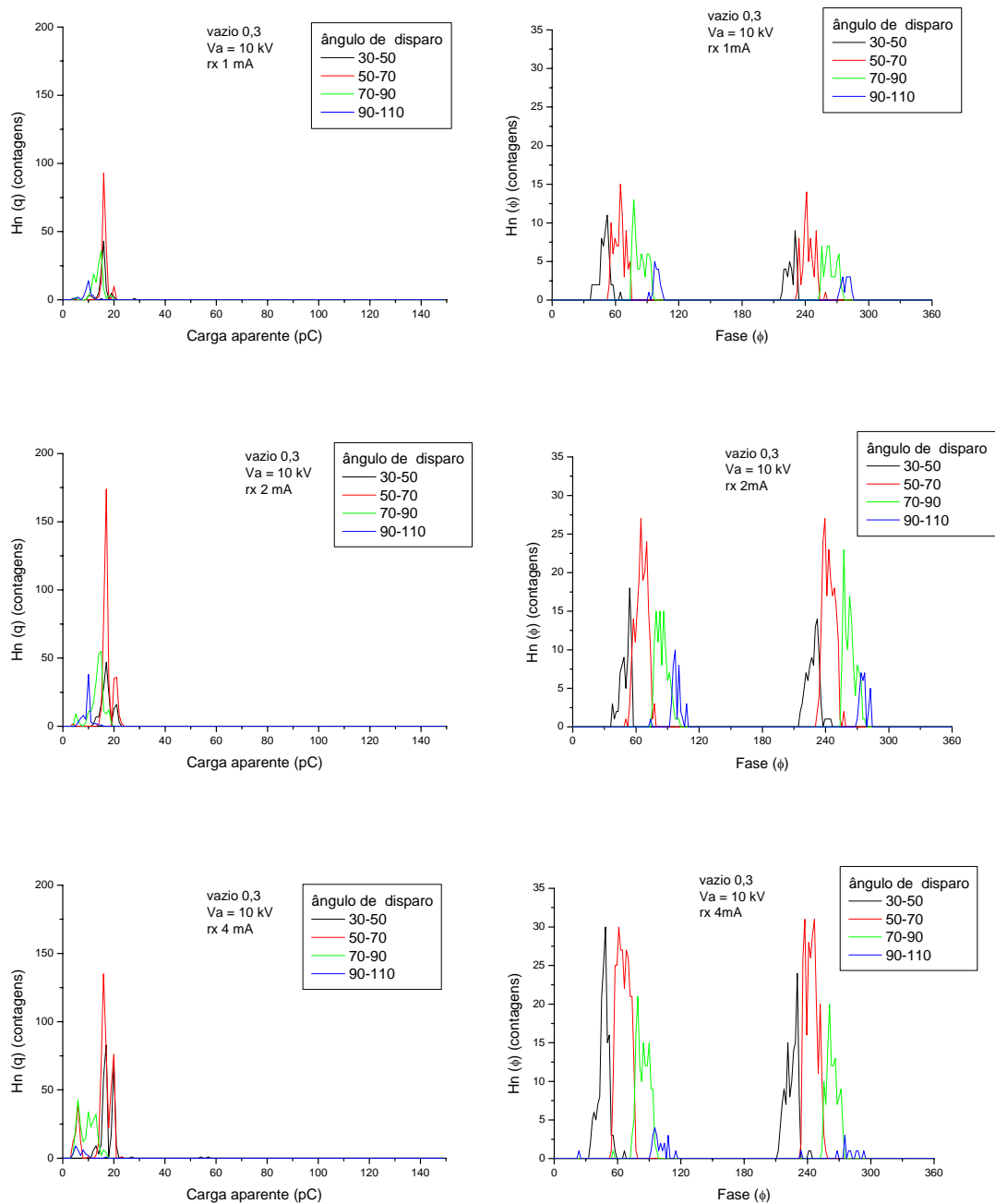


Figura 6.30. Amostra de epóxi, E3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (50kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

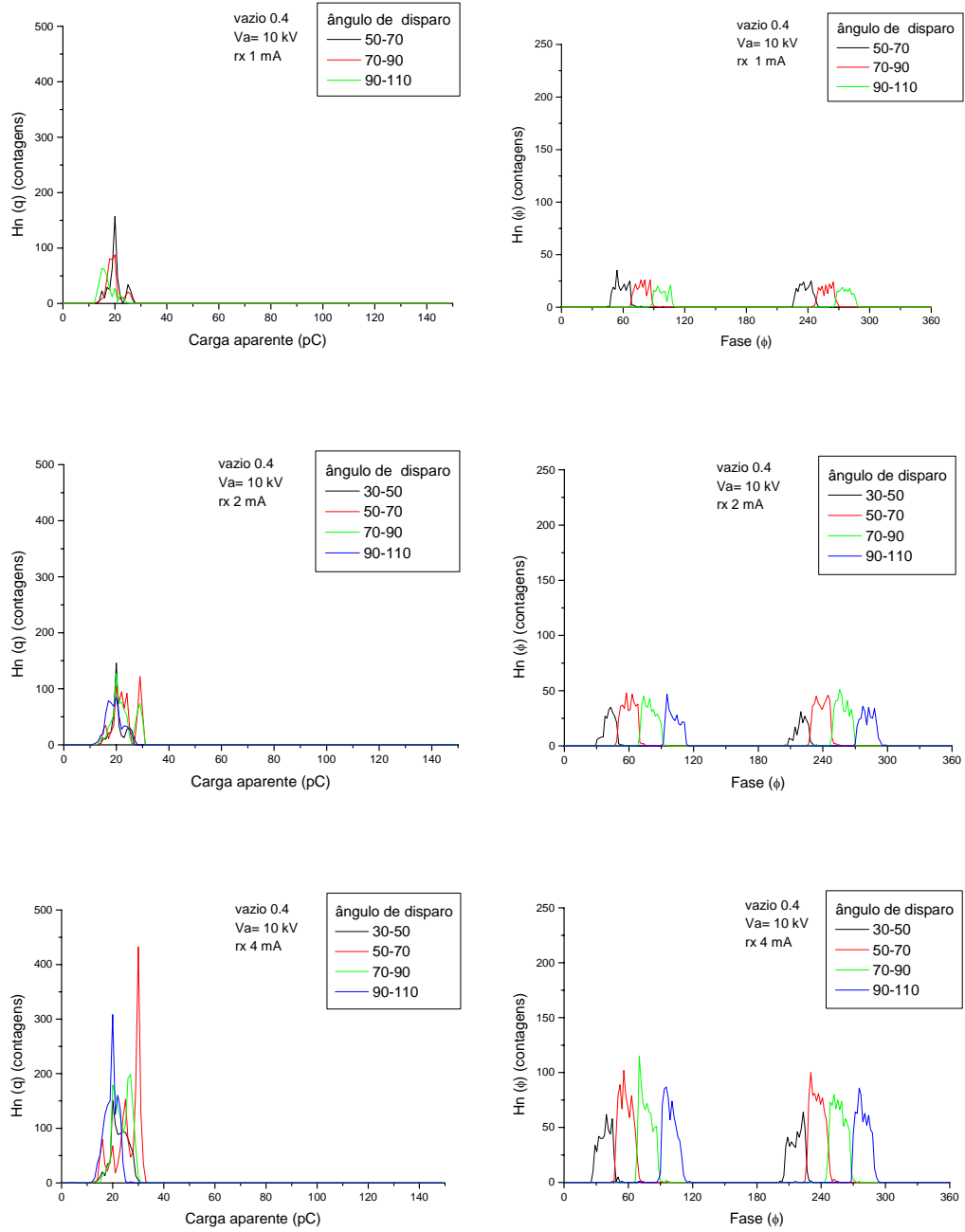


Figura 6.31. Amostra de epóxi, E4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

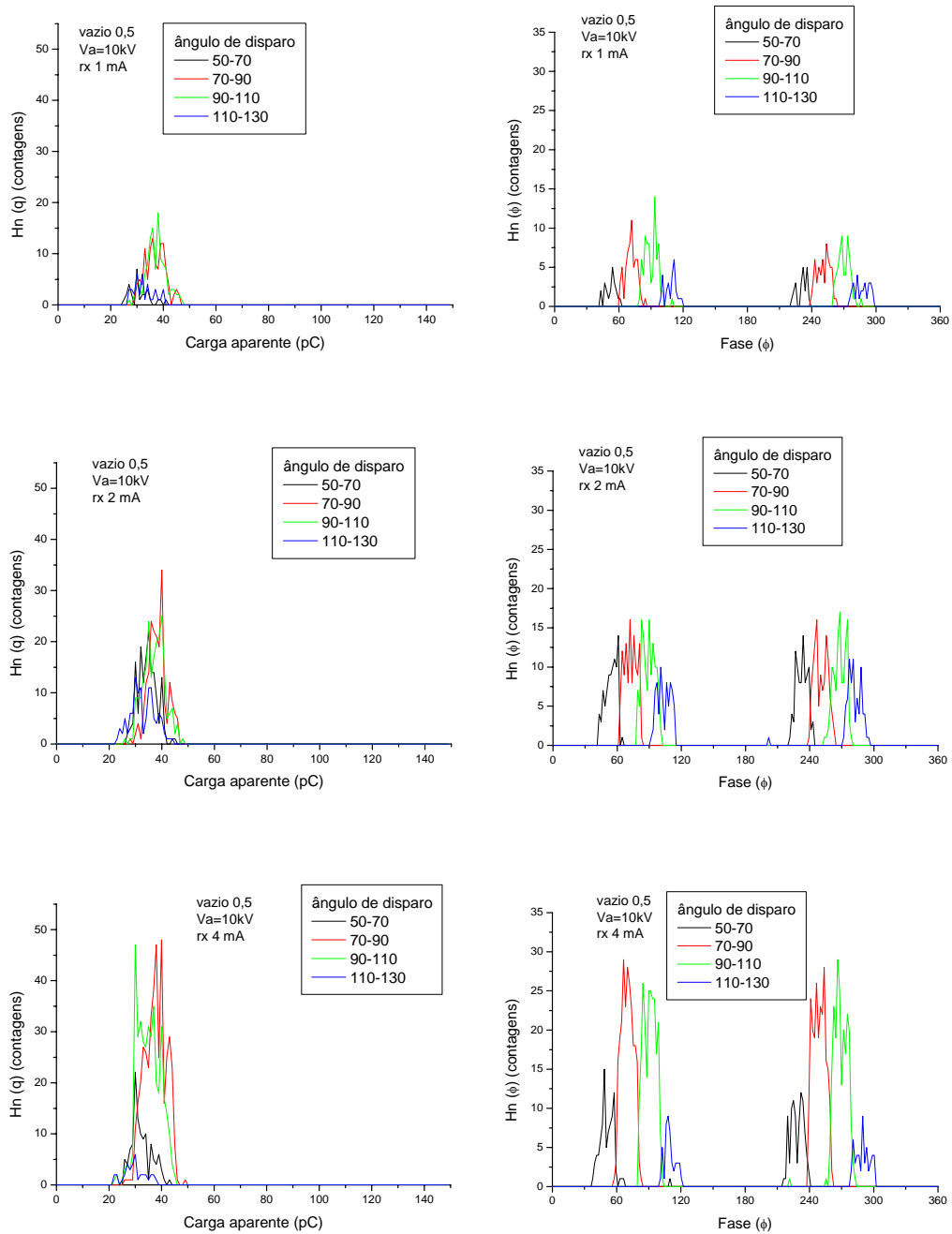


Figura 6.32. Amostra de epóxi, E5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

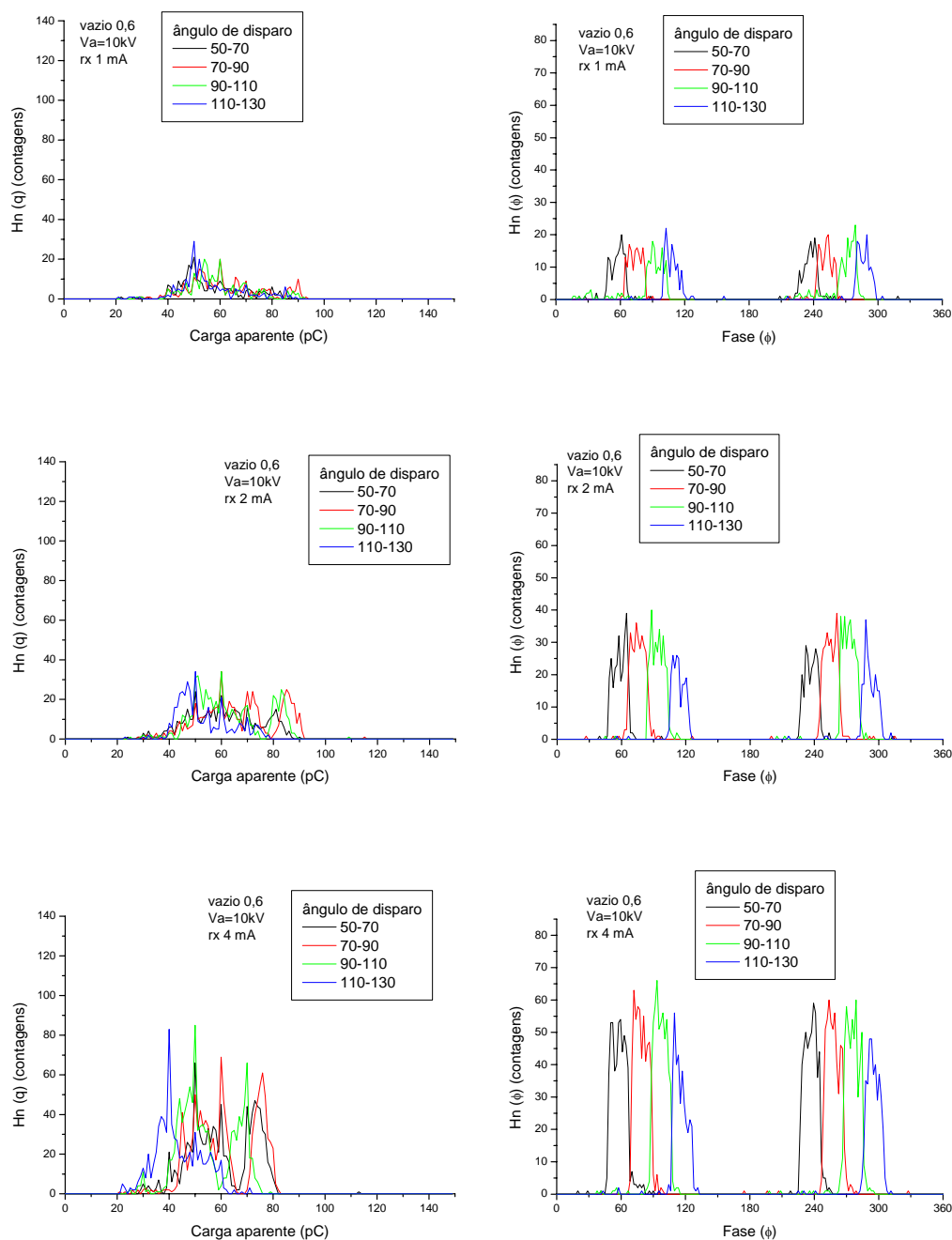


Figura 6.33. Amostra de epóxi, E6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X contínuo (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

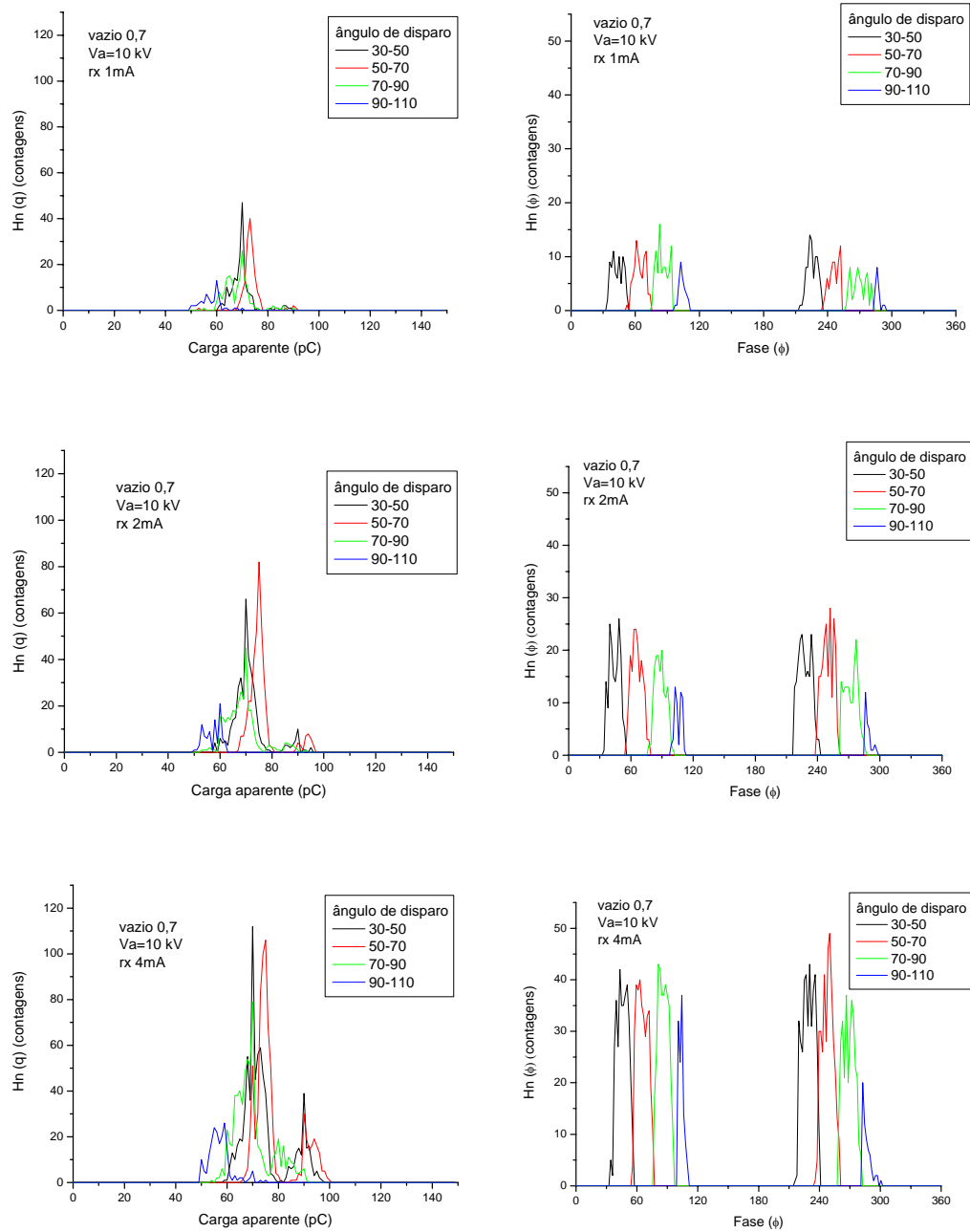


Figura 6.34. Amostra de epóxi, E7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

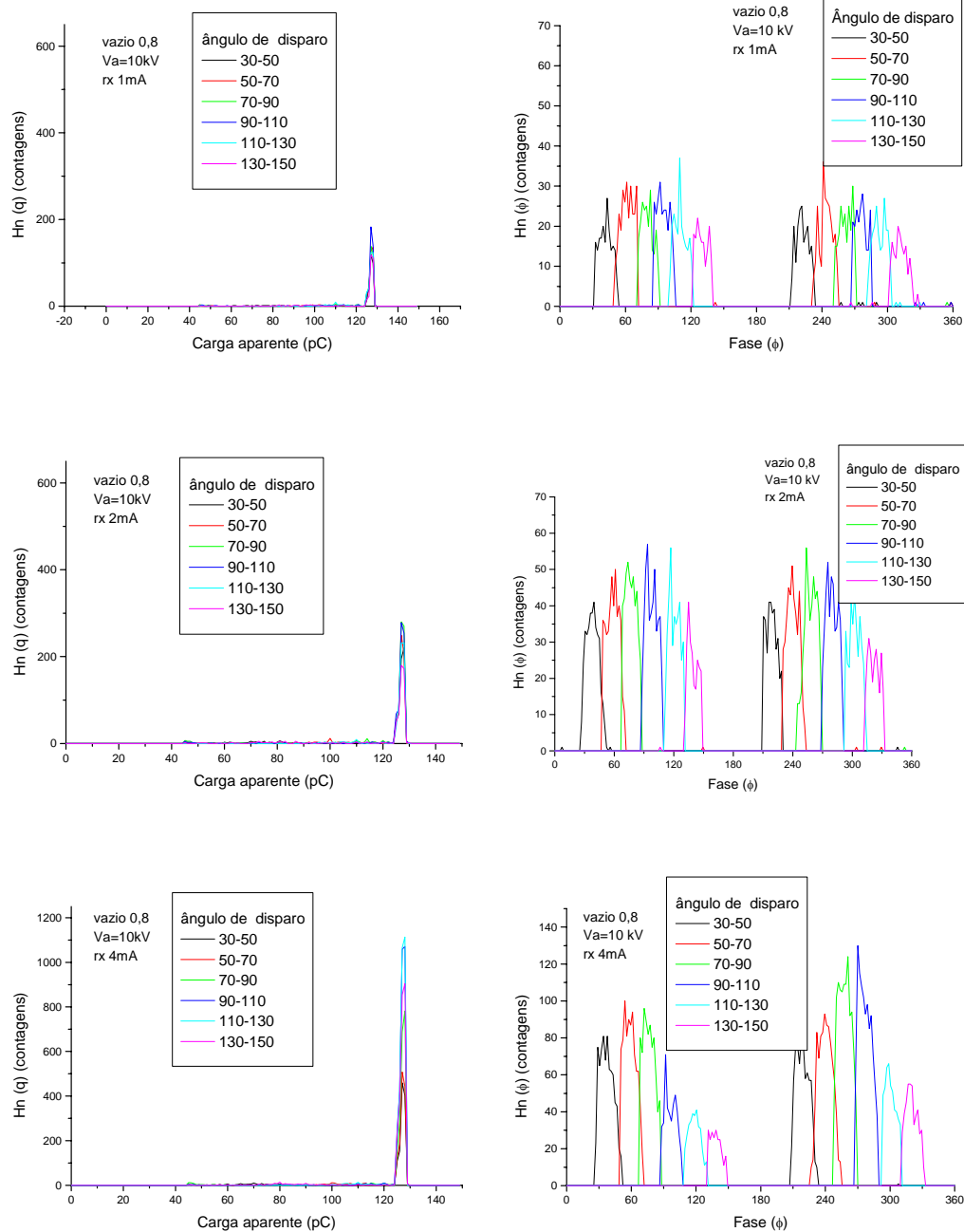


Figura 6.35. Amostra de epóxi, E8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

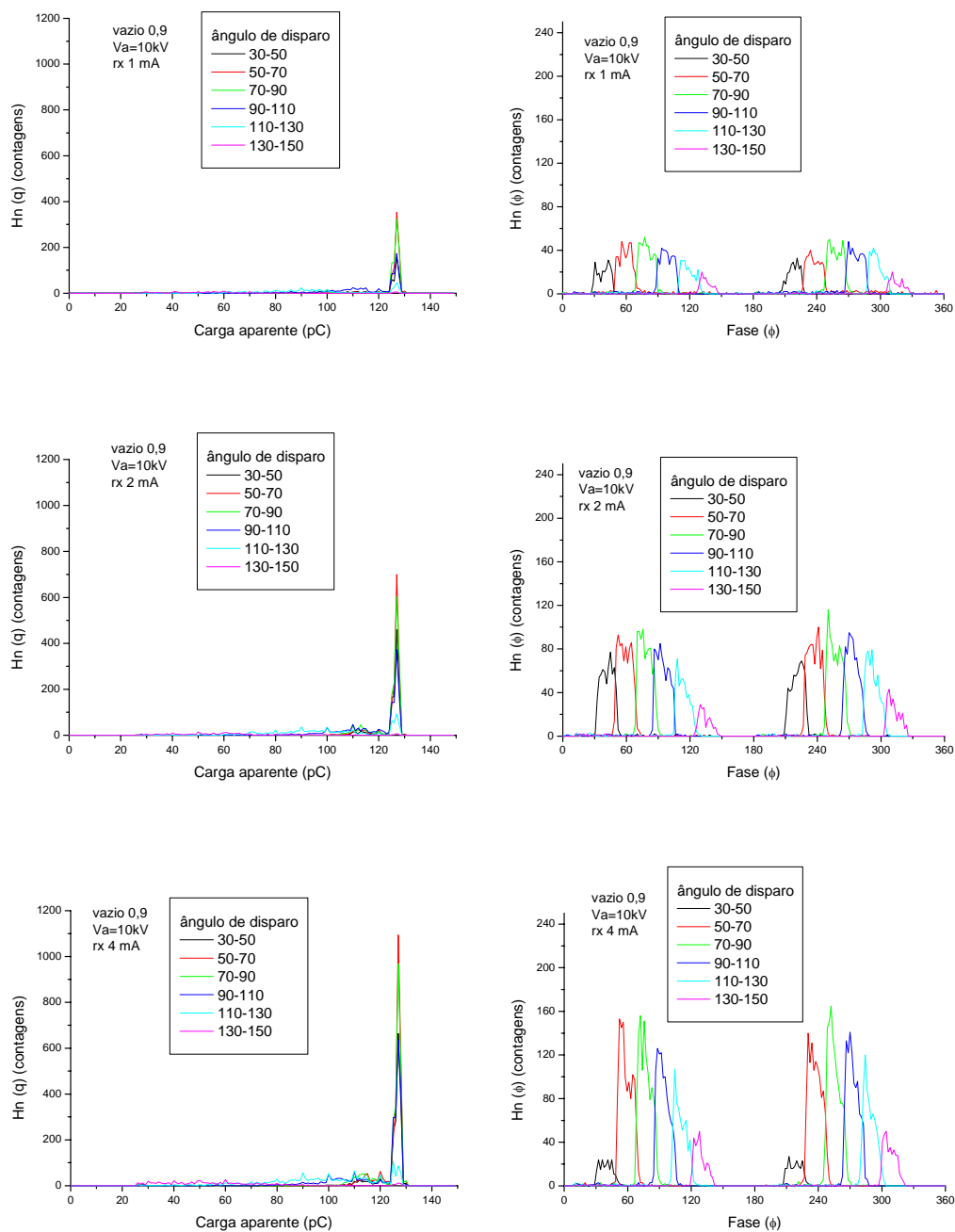


Figura 6.36. Amostra de epóxi, E9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 10 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

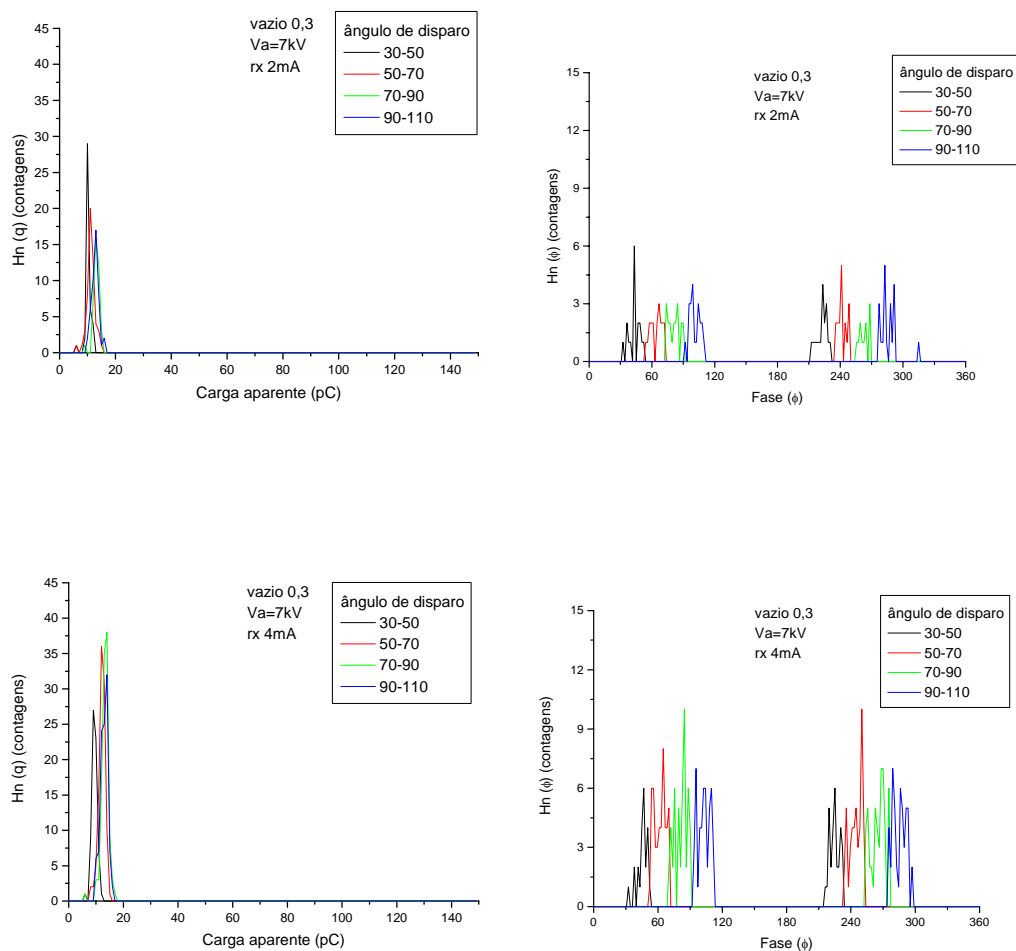


Figura 6.37. Amostra de polietileno, P3: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV –2 e 4 mA).

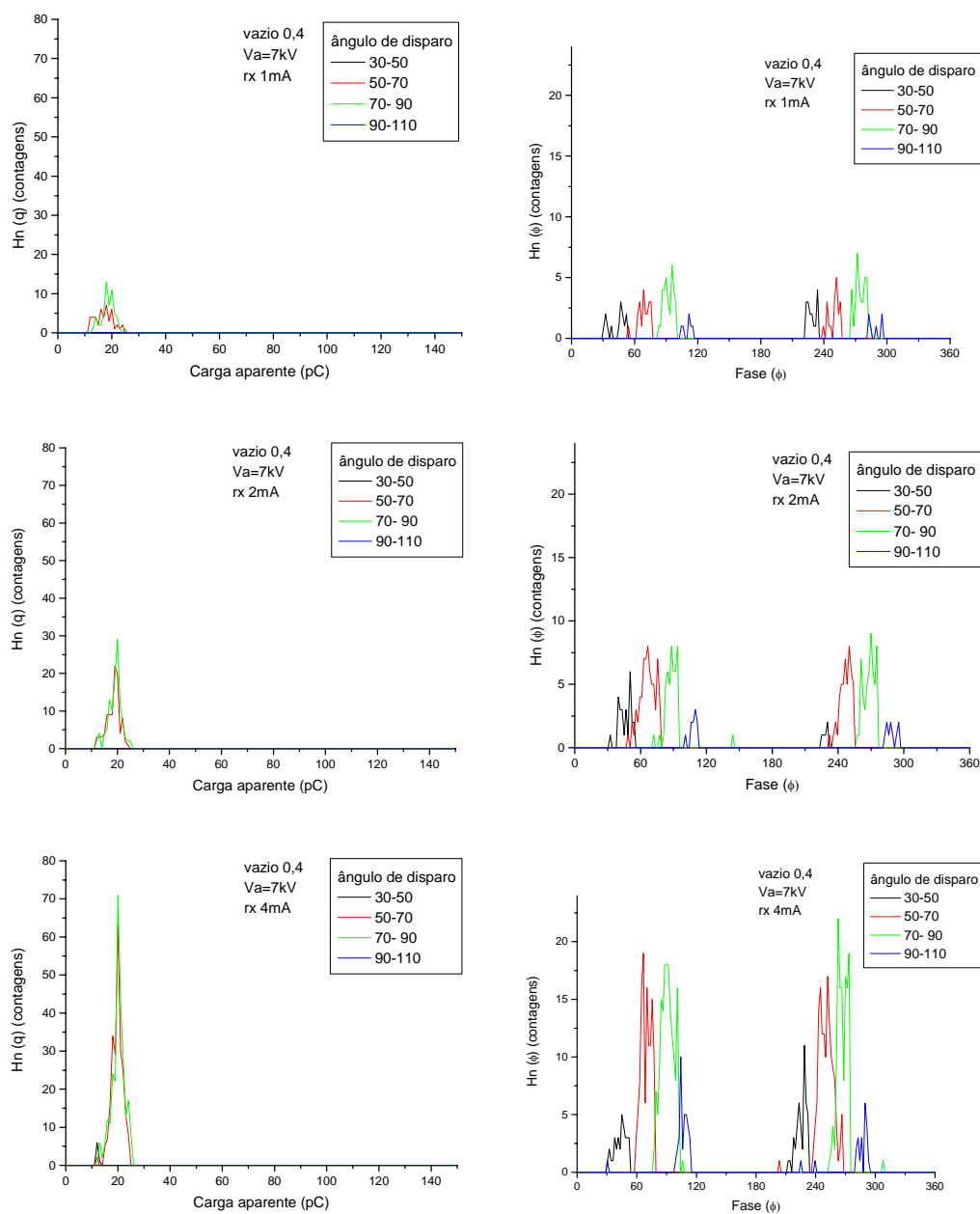


Figura 6.38. Amostra de polietileno, P4: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

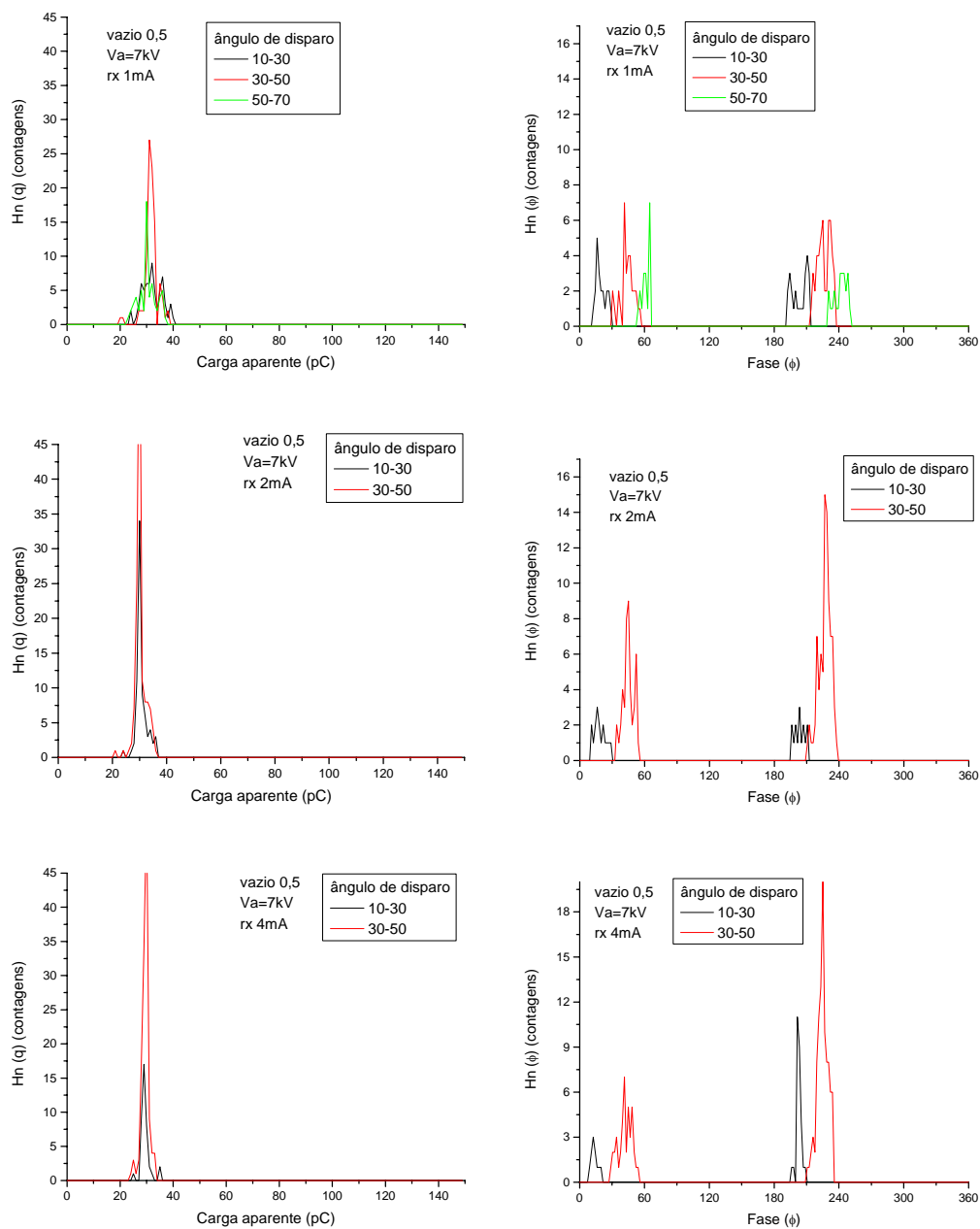


Figura 6.39. Amostra de polietileno, P5: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

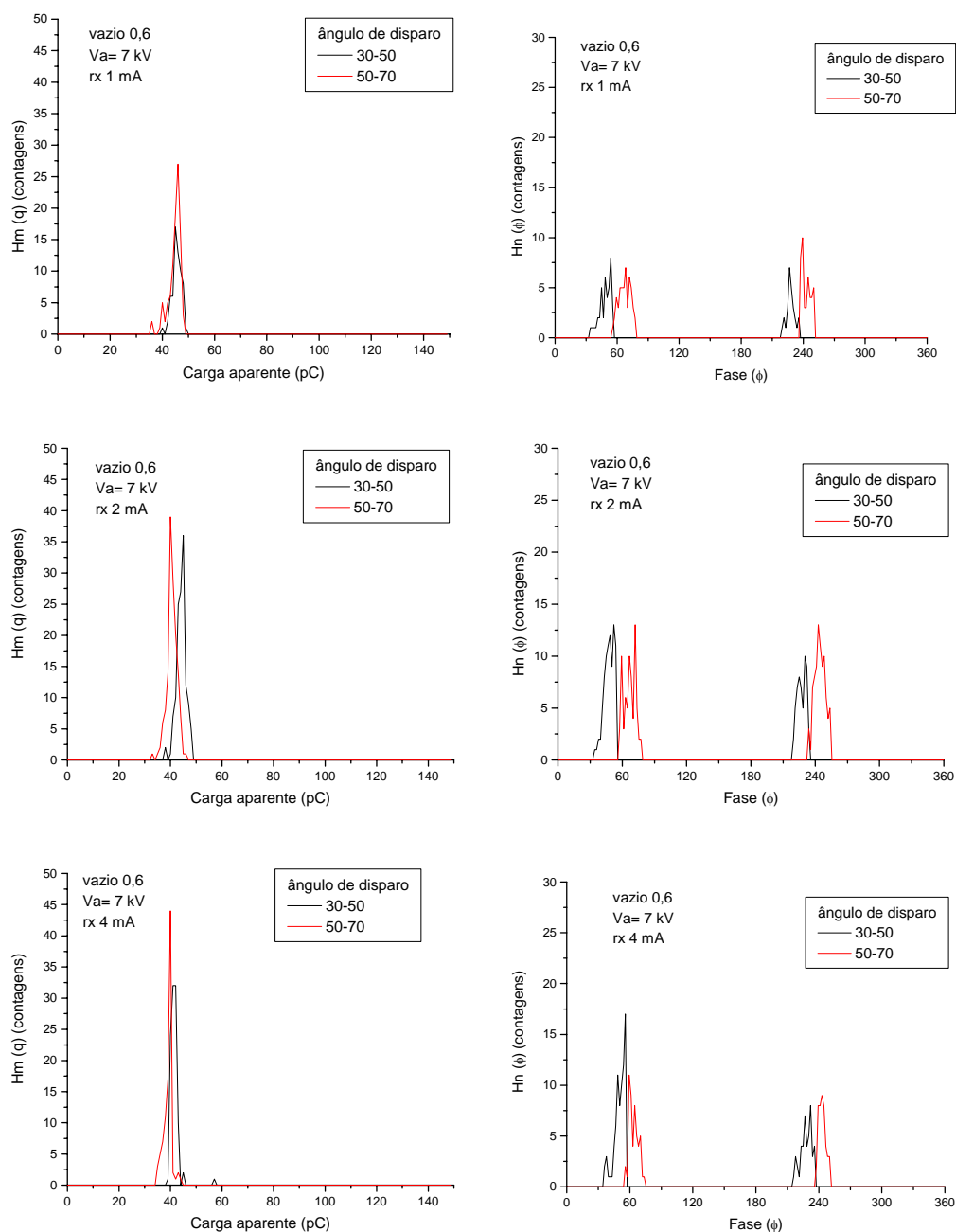


Figura 6.40. Amostra de polietileno, P6: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA e 2 mA).

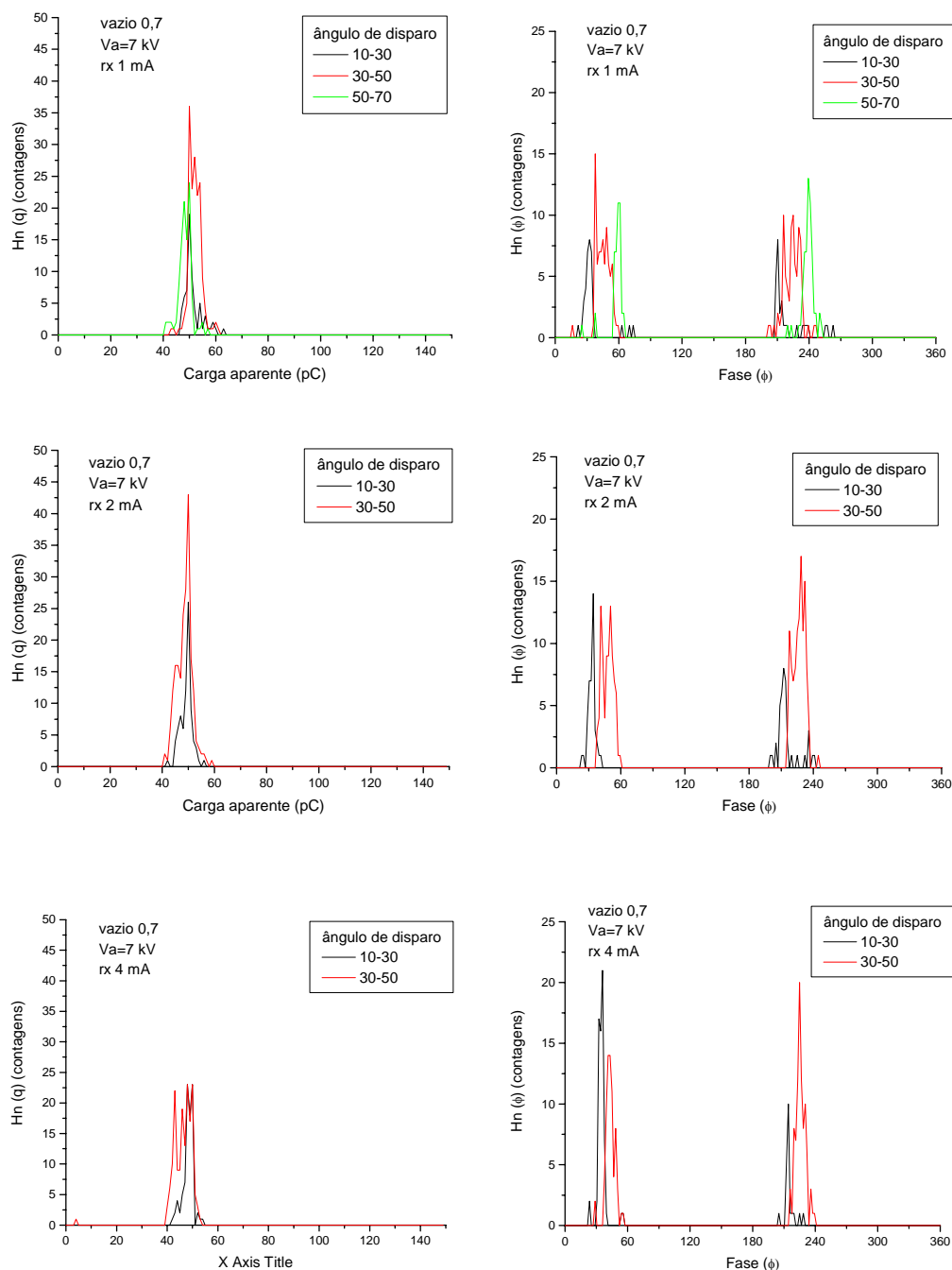


Figura 6.41. Amostra de polietileno, P7: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

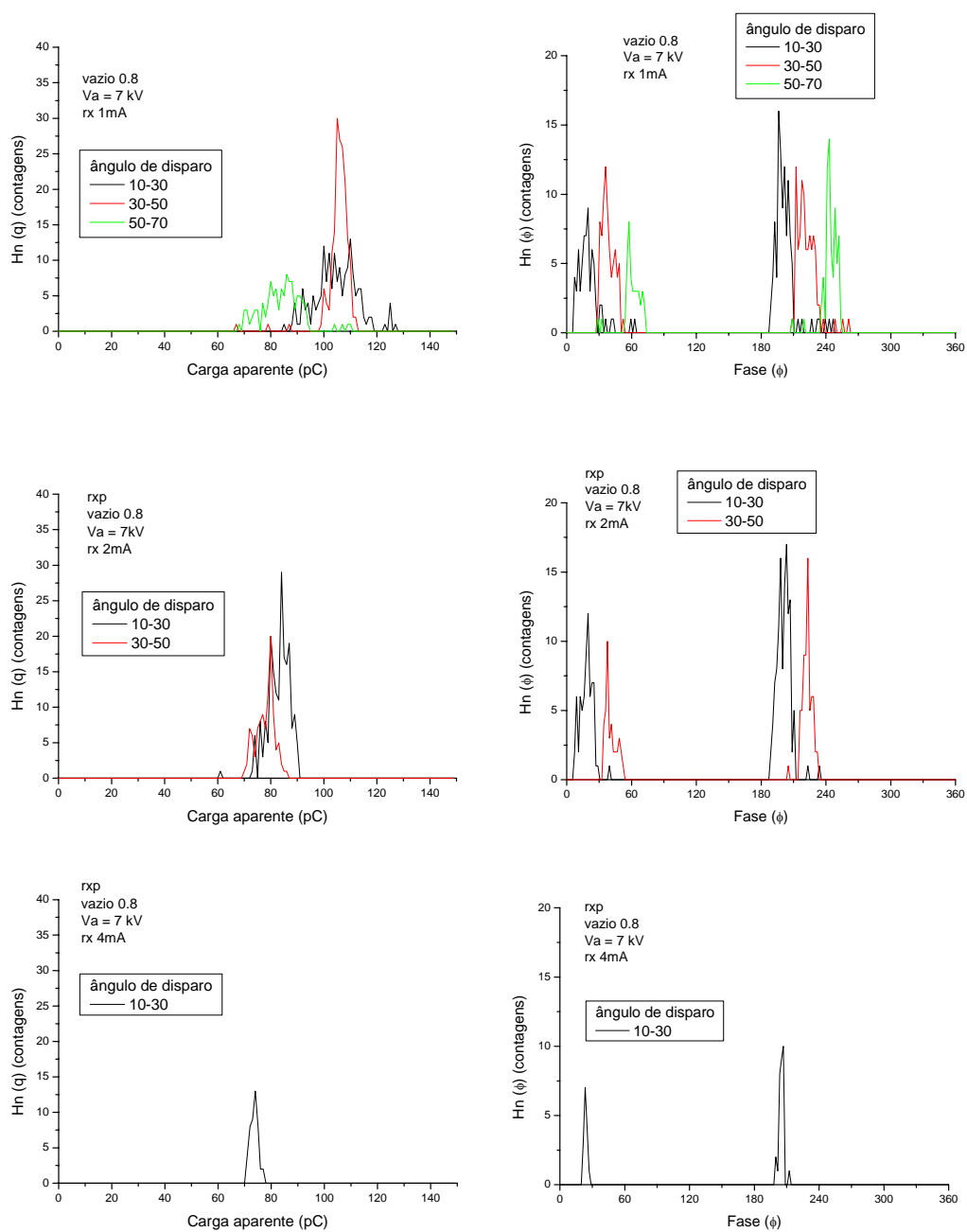


Figura 6.42. Amostra de polietileno, P8: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

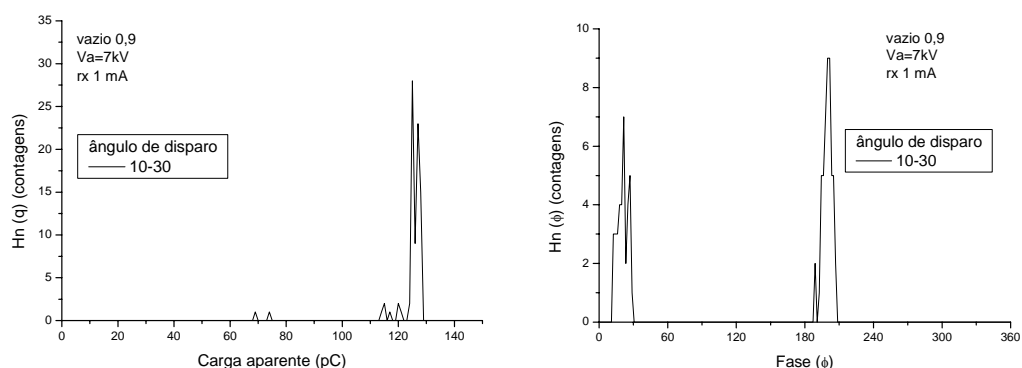


Figura 6.43. Amostra de polietileno, P9: distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ para tensão aplicada de 7 kV e diferentes intensidades de raios-X pulsado (35 kV – 1 mA, 2 mA e 4 mA).

Para as amostras de epóxi (figuras 6.30 a 6.36), em geral, quanto maior a intensidade dos raios-X pulsado maior é o número de ocorrências de descargas, resultado similar ao que ocorre no caso de raios-X contínuo. Tal assertiva não pode ser generalizada no caso das amostras de polietileno (figuras 6.37 a 6.43). Descargas parciais, quando estimuladas com raios-X pulsado, ocorrem dentro de uma faixa limitada de ângulo de disparo, havendo intervalos de fase onde não há ocorrência de descargas. Para a maior parte das amostras de epóxi testadas as descargas ocorrem na faixa de ângulo de disparo de 30° a 110° no semiciclo positivo e de 210° a 290° no semiciclo negativo. Esta faixa de ângulo de disparo é mais larga para vazios com diâmetros maiores. Para todas as amostras de epóxi testadas, em todas as intensidades de feixe utilizadas, a maior probabilidade de ocorrência de descargas se situa na faixa de ângulo de disparo entre 70° e 90° . Ainda, para todas as amostras o ângulo de início da ocorrência das descargas é aproximadamente 30° e independe do diâmetro do vazio. A faixa de 30° a 50° foi omitida de alguns gráficos em virtude do

número de contagens, observadas no osciloscópio, ser muito pequena. Sugere-se que o fato das descargas parciais não ocorrerem para ângulos inferiores a 30° seja devido ao não preenchimento da condição de campo.

Para as amostras de polietileno pode ser notado que a faixa de ângulo de disparo, a faixa de maior probabilidade de ocorrência e o ângulo de início variam com o diâmetro do vazio. Para os vazios com menor diâmetro as ocorrências iniciam a partir de 30° , enquanto que para os vazios de diâmetro maior estas iniciam a partir de 10° . A faixa de ângulo de disparo é menor para vazios com maior diâmetro. Da mesma forma que no caso do epóxi sugere-se que o fator determinante do ângulo de início seja o preenchimento da condição de campo. Como para vazios maiores a tensão de início é menor, é natural que vazios com diâmetro maior tenham menor ângulo de início. É observado ainda que à medida que aumenta o diâmetro dos vazios as descargas ocorrem somente para menores valores de intensidade de raios-X, sendo um indício adicional da supressão da ocorrência de descargas. A supressão das descargas para intensidades de raios-X maiores pode ser devido à formação de camada condutiva, decorrente de oxidação, na superfície de vazio [TANAKA, 1986, KIM, 2004].

6.2.2. CARGA APARENTE TOTAL POR CICLO

A partir da distribuição $H_n(q)$ dois parâmetros quantitativos foram obtidos: (i) o valor de pico da carga aparente, que equivale à moda da distribuição e (ii) a carga aparente total por ciclo. Os valores de pico da carga aparente, para as amostras testadas, são mostrados na tabela 6.3 e figura 6.41. Temos que quanto maior o

diâmetro do vazio maior o valor de pico da carga aparente transferida durante a atividade de descargas parciais, resultado este similar ao obtido nas medidas com raios-X contínuo.

Tabela 6.3. Pico da carga aparente em função do diâmetro do vazio para amostras de epóxi e de polietileno, raios-X pulsado	
EPÓXI	
Diâmetro (mm)	Pico da carga aparente (pC)
0,3	17
0,4	20
0,5	35
0,6	não definido
0,7	70
0,8	130 ^(*)
0,9	130 ^(*)
POLIETILENO	
Diâmetro (mm)	Pico da carga aparente (pC)
0,3	10
0,4	20
0,5	30
0,6	40
0,7	50
0,8	100
0,9	130 ^(*)

(*) O valor registrado do pico de carga aparente está limitado pela capacidade do detector utilizado, conforme explicado no capítulo 5, item 5.2.

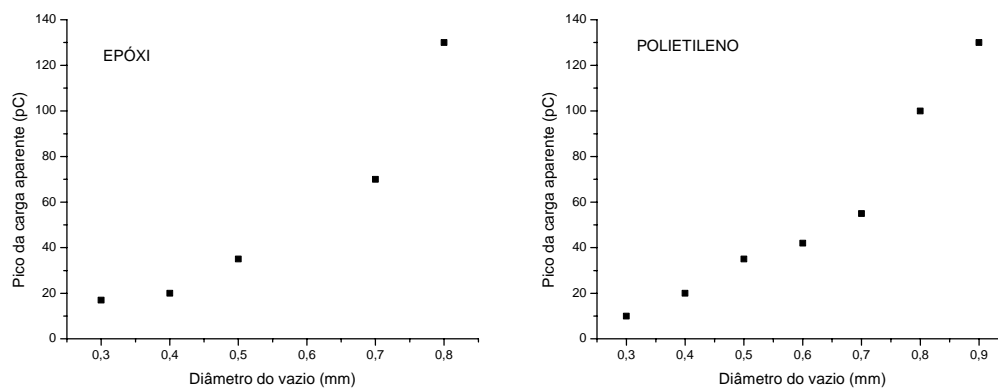


Figura 6.44. Valor de pico da carga aparente para amostras de epóxi e polietileno – raios-X pulsado.

As figuras 6.45 e 6.46 mostram os valores de carga aparente total por ciclo em função do diâmetro do vazio, intensidade do raio-X e ângulo de disparo, para as amostras de epóxi e de polietileno. Para as amostras de epóxi (figura 6.45) normalmente tem-se que, da mesma maneira como obtido nas medidas com raios-X contínuo, quanto maior a intensidade do feixe de raios-X e maior a diâmetro do vazio, maior a carga aparente total por ciclo. Para as amostras de polietileno (figura 6.46), em geral, a carga aparente total por ciclo aumenta com o aumento do diâmetro do vazio. Todavia, o mesmo não pode ser afirmado com relação ao efeito do aumento da intensidade de raios-X.

Nas medidas com raios-X pulsado o cálculo de parâmetros estatísticos da distribuição $H_n(\phi)$ não se justifica, uma vez que as descargas são ativadas em faixas de ângulo de disparo pré-selecionadas.

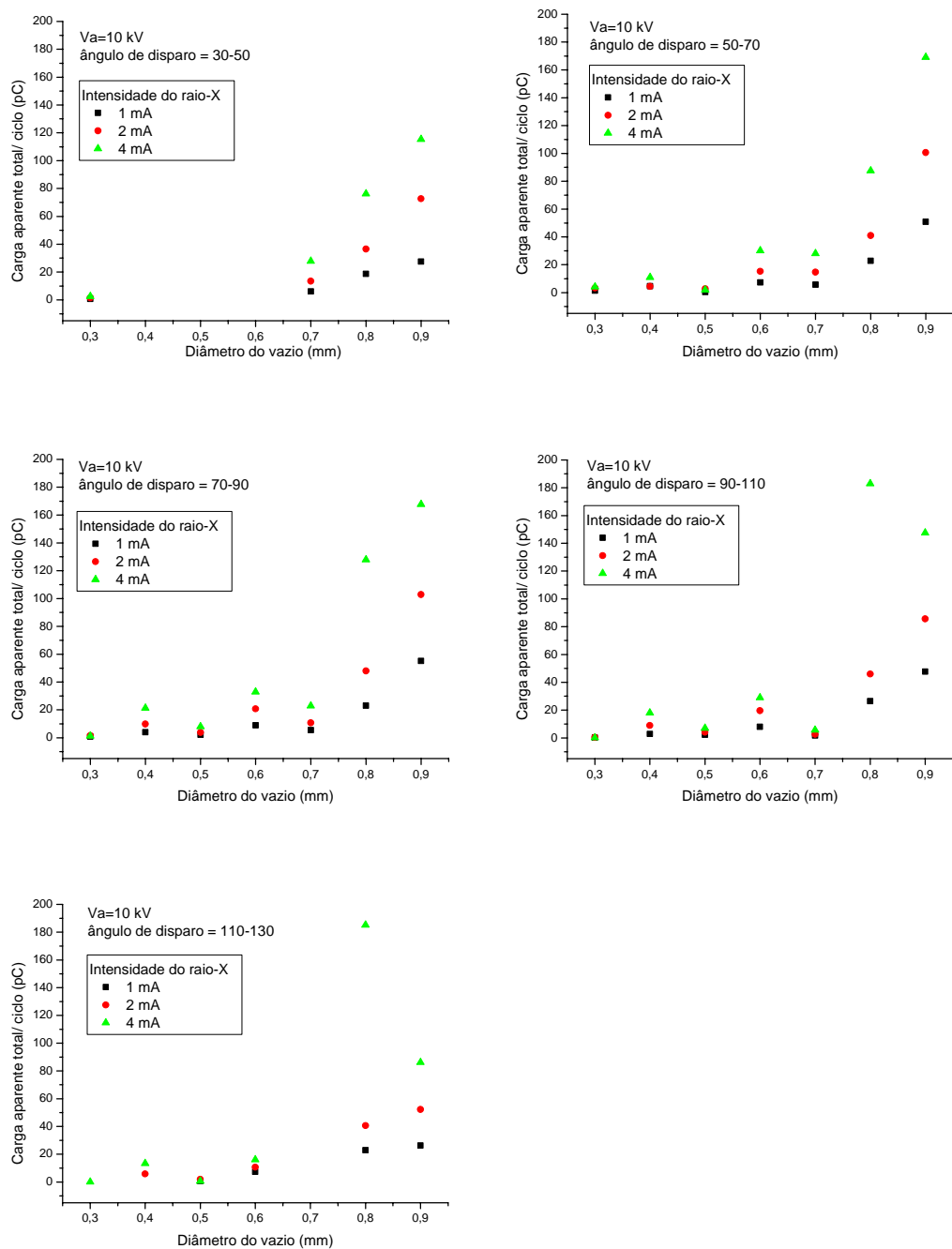


Figura 6.45. Amostras de epóxi - carga aparente total por ciclo em função do diâmetro do vazio, intensidade de raios-X e ângulo de disparo.

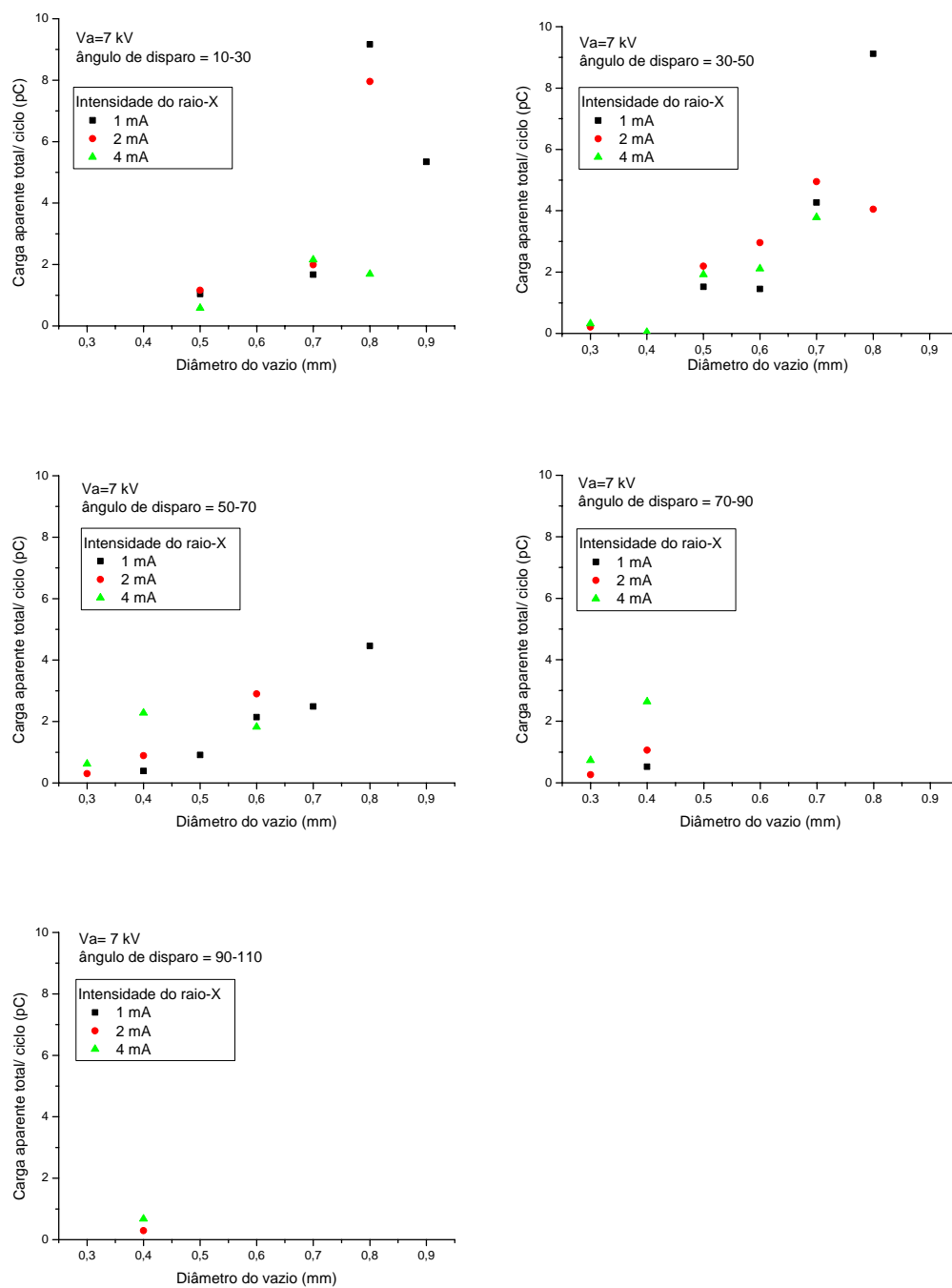


Figura 6.46. Amostras de polietileno - carga aparente total por ciclo em função do diâmetro do vazio, intensidade de raios-X e ângulo de disparo.

Uma das características mais importantes das descargas parciais internas estimuladas com raios-X pulsado é que estas ocorrem somente no intervalo de tempo coincidente com o intervalo de duração do pulso de raios-X, para todos os níveis de intensidade do feixe utilizados. Este fato mostra que, nestas condições, além do fato das descargas serem moduladas pelo pulso de raios-X, somente as descargas no vazio estão sendo ativadas, não existindo outro tipo de descarga (superficial ou corona) atuando. Caso estivesse em atividade outro mecanismo de descarga, seja descarga superficial ou corona, este apareceria ou fora da faixa de ângulo de disparo ou superposto a esta. Sinais superpostos podem ser discriminados através da análise da distribuição de ocorrência em função da carga aparente. Desta forma, a medida de descargas parciais quando estimuladas com raios-X pulsado permite distinguir diferentes fontes de descarga. Outro fator importante nas medidas com raios-X pulsado é que, durante a realização de um eventual teste de localização de defeitos, em uma amostra com fontes de descarga desconhecidas, pode ser utilizado somente o disparo em uma determinada faixa de ângulo de disparo. Desta forma, a amostra em teste fica menos tempo exposta aos raios-X e a ação de descargas, reduzindo assim os riscos de degradação.

Com o intuito de verificar se durante o período em que as amostras ficaram submetidas à ação contínua de descargas parciais estimuladas com raios-X houve algum tipo de alteração na estrutura química dos materiais e, ainda, elucidar as diferenças observadas no comportamento dos diferentes materiais testados, foram realizadas medidas de microscopia eletrônica de varredura e análise de energia dispersiva.

6.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ANÁLISE DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

As figuras de 6.47 a 6.50 apresentam imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras, de epóxi e polietileno de baixa densidade (LDPE), novas e após realização do teste. Das figuras 6.47 e 6.48 pode ser notado que os vazios formados no processo de cura do epóxi são esféricos e que as amostras de epóxi, antes e pós-descarga, não apresentam visualmente nenhuma diferença significativa. Por outro lado, das figuras 6.49 e 6.50, pode ser observado que as amostras de polietileno, depois de submetidas à tensão elétrica e raios-X simultaneamente, apresentam a formação de espécies de gotículas no interior do vazio. Resultados similares foram observados para o polietileno entrecruzado em [GAMEZ-GARCIA, 1987].

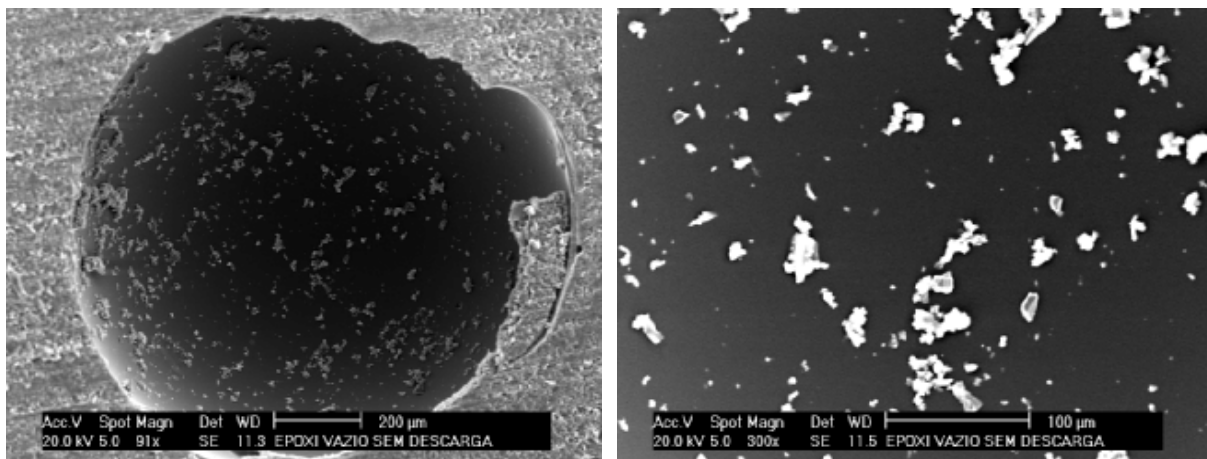


Figura 6.47. Amostra de epóxi nova, i.e., sem ocorrência prévia de descargas parciais.

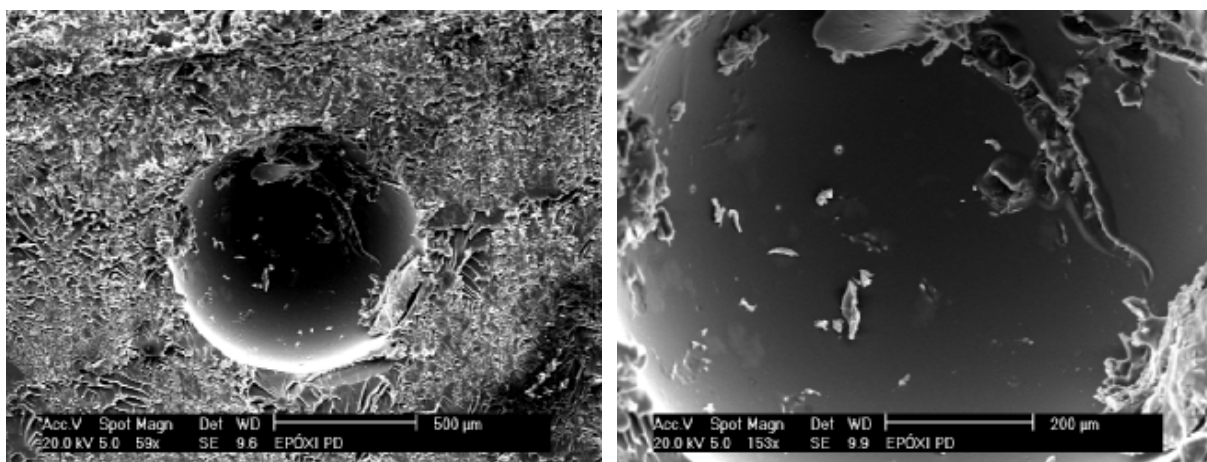


Figura 6.48. Amostra de epóxi após a realização do teste de descargas parciais estimuladas com raios-X.

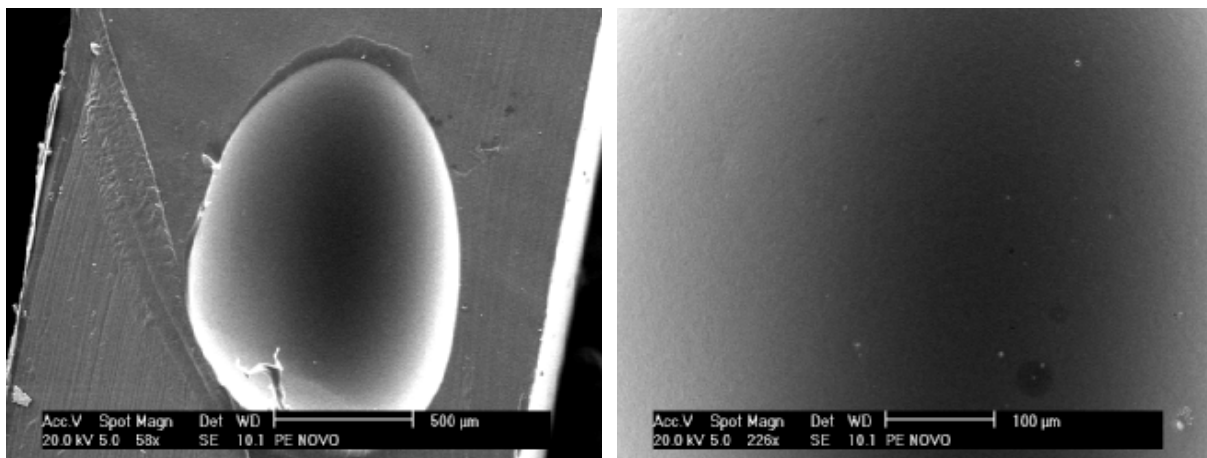


Figura 6.49. Amostra de polietileno nova, i.e., sem ocorrência prévia de descargas.

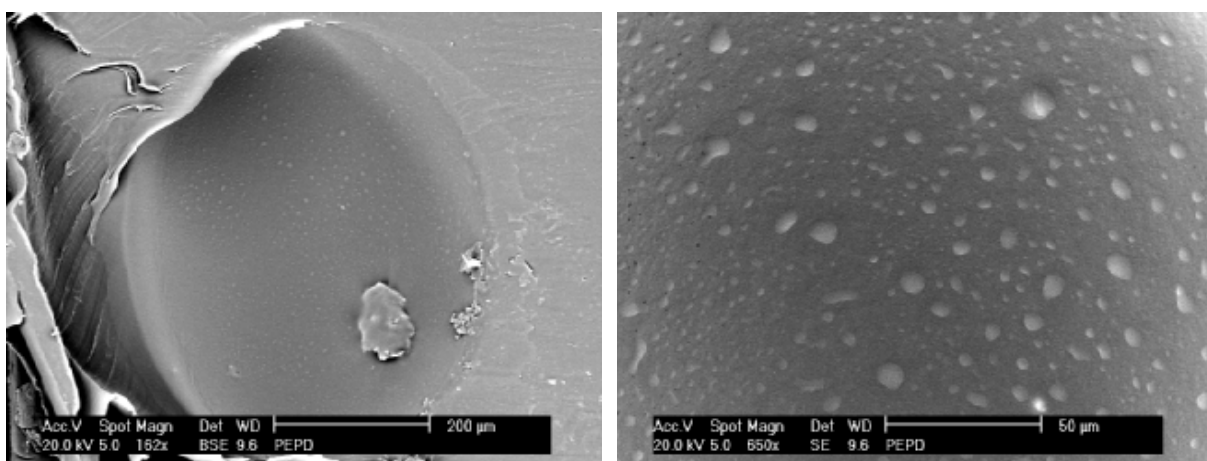


Figura 6.50. Amostra de polietileno após a realização do teste de descargas parciais estimuladas com raios-X.

Uma avaliação comparativa da composição química das amostras de epóxi e polietileno, antes e após a realização do teste, pode ser realizada ao analisar os resultados de EDS. As tabelas 6.4 e 6.5 mostram os resultados obtidos para as amostras de epóxi e polietileno, respectivamente.

Tabela 6.4. EDS: amostras de epóxi novo e pós-descarga		
	Epóxi novo	Epóxi pós-descarga
Elemento	Peso (%)	Peso (%)
C	de 20 a 40	de 20 a 30
O	de 60 a 80	de 70 a 80
Total	100	100

Tabela 6.5. EDS: amostras de polietileno novo e pós-descarga		
	LDPE novo	LDPE pós-descarga
Elemento	Peso (%)	Peso (%)
C	100	de 30 a 40
O	-	de 60 a 70
Total	100	100

A tabela 6.4 mostra que os elementos constituintes das amostras de epóxi são, conforme esperado, o carbono e o oxigênio. Em ambos os casos, amostras novas e pós-descarga, não houve alteração significativa da presença de oxigênio neste material. Para o polietileno, a tabela 6.5 mostra que as amostras novas contêm somente carbono como elemento constituinte. Por outro lado, pode ser notado que as amostras submetidas ao teste de descargas parciais estimuladas com raios-X apresentam a presença do elemento oxigênio em grande quantidade. O aparecimento do elemento oxigênio nas amostras de polietileno após a realização do teste de descargas parciais

estimuladas com raios-X são um forte indício de que está ocorrendo oxidação na superfície do vazio. Foi observado experimentalmente que o polietileno quando exposto a ação de descargas parciais forma uma camada de oxidação contendo radicais carbonila [TANAKA, 1986]. Os principais produtos encontrados durante a atividade de descargas parciais em amostras de polietileno são gases (CO_2 , CO e H_2O), gotas líquidas e cristais (geralmente ácido oxálico). Ainda, a formação destes produtos no vazio tende a causar a supressão das atividades de descargas parciais [KIM, 2004].

Estes resultados vêm a elucidar alguns pontos das discussões realizadas anteriormente. Em primeiro lugar mostra que, dos diferentes materiais testados, epóxi e polietileno, o primeiro é muito mais resistente à ação das descargas parciais. Vale lembrar que nenhum dos materiais testados contém aditivos de qualquer espécie, i.e., estão em estado puro. Além disto, a rápida degradação do polietileno quando submetido à ação contínua de descargas parciais vem a explicar o fato das distribuições de ocorrência não serem bem comportadas para este material, bem como explicar a supressão da atividade de descargas parciais durante as medidas realizadas.

6.4. SIMILARIDADES E DIFERENÇAS

O quadro abaixo apresenta, de forma resumida, as principais características do comportamento das descargas parciais quando estimuladas com raios-X contínuo e pulsado para os distintos materiais testados.

Raios-X contínuo	Raios-X pulsado
Tensão de início é maior para vazios com menor diâmetro.	Tensão de início observada via osciloscópio é superior ao valor medido com raios-X contínuo.
Para as amostras de epóxi é observado, em geral, que quanto maior a tensão aplicada e a intensidade de raios-X, maior o número de ocorrência de descargas e maior a carga aparente total por ciclo. Para as amostras de polietileno, de uma forma geral, o número de ocorrências de descargas diminui com o aumento da intensidade de raios-X. O efeito dos raios-X é mais significativo do que o efeito da tensão aplicada.	Para as amostras de epóxi, normalmente, quanto maior a intensidade de raios-X maior o número de ocorrência de descargas e maior a carga aparente total por ciclo. Tal assertiva não pode ser generalizada para as amostras de polietileno.
Para as amostras testadas, à medida que aumenta a intensidade de raios-X as descargas passam a se concentrar em torno de um determinado ângulo de fase, sendo este efeito mais pronunciado em vazios com maior diâmetro. Tal afirmativa é confirmada quantitativamente pelo parâmetro assimetria.	Cálculo de parâmetros estatísticos não se justifica.
O pico da carga aparente é proporcional ao diâmetro do vazio.	O pico da carga aparente é proporcional ao diâmetro do vazio.
Para um maior diâmetro de vazio, maior a carga aparente transferida durante a atividade de descargas parciais.	Para um maior diâmetro de vazio, maior a carga aparente transferida durante a atividade de descargas parciais.
Para as amostras de epóxi a maior probabilidade de ocorrência de descargas parciais está na faixa de ângulo de fase de 50° a 90° e 230° a 270° , independente do diâmetro do vazio. Para as amostras de polietileno esta faixa de ângulo de fase diminui com o aumento do diâmetro do vazio.	Para as amostras de epóxi a maior probabilidade de ocorrência de descargas parciais está na faixa de 70° a 90° e 250° a 270° . Para as amostras de polietileno esta faixa de maior probabilidade de ocorrência diminui com o aumento do diâmetro do vazio, sendo menor para intensidades de raios-X maiores.
O ângulo de início de ocorrência de descargas depende do tamanho do vazio.	Para as amostras de epóxi o ângulo de início de ocorrência de descargas parciais (30°) independe do tamanho do vazio. Para o polietileno este ângulo varia com o diâmetro do vazio, sendo menor para vazios com maior diâmetro.
Há ocorrência de descargas parciais durante um amplo período da tensão aplicada.	As descargas parciais ocorrem somente no intervalo de tempo coincidente com o intervalo de duração do pulso de raios-X.
Não é possível a distinção entre diferentes fontes de descarga (descarga interna, superficial e corona).	Através da análise conjunta das distribuições $H_n(q)$ e $H_n(\phi)$ é possível a distinção entre diferentes fontes de descarga.
Maior tempo de exposição à radiação.	Menor tempo de exposição à radiação. Deste modo, possíveis efeitos de degradação podem ser evitados.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A técnica de medida de descargas parciais estimuladas com raios-X, contínuo e pulsado, apresenta-se como uma ferramenta eficiente para detecção de descargas parciais em materiais isolantes sólidos. As medidas foram realizadas, em amostras de epóxi e polietileno com vazios de diâmetros distintos, com o objetivo de verificar as similaridades e diferenças das duas formas de irradiação de raios-X - contínuo e pulsado – utilizadas, assim como o comportamento dos distintos materiais testados.

A irradiação de materiais isolantes sólidos com raios-X contínuo e pulsado permite modular a atividade de descargas parciais e realizar medidas com tensões relativamente baixas. Este último fato permite reduzir os riscos inerentes às medidas realizadas com alta tensão. Medidas com raios-X contínuo têm como possibilidade a realização do cálculo de parâmetros estatísticos das distribuições, tais como a assimetria, que permitem acompanhar quantitativamente o comportamento das descargas. No caso do polietileno, o tempo de exposição à ação das descargas (aproximadamente 30 s) é suficientemente grande para ocasionar alterações químicas no material. Por sua vez, nas medidas com raios-X pulsado o material fica exposto durante um tempo bastante curto (aproximadamente 2 s) à ação das descargas, evitando assim este tipo de efeito não desejado. Além disto, as medidas com raios-X pulsado permitem a identificação de distintas fontes de descarga (interna, superficial e corona).

Com relação aos materiais utilizados, foram testados o epóxi e o polietileno. O epóxi é um material termofixo com estrutura entrecruzada; o polietileno de baixa densidade, com ramificações, é um material termoplástico. Para todas as amostras de epóxi foi mostrado que, quanto maior a intensidade dos raios-X maior a amplitude da distribuição de ocorrências e maior a carga aparente total por ciclo. No polietileno temos que com o aumento da intensidade de raios-X ocorre uma redução na distribuição de ocorrências e na carga aparente total por ciclo. Esta redução é decorrente da supressão da atividade de descargas parciais. Para os dois materiais testados foi observado que na medida que se aumenta a intensidade dos raios-X contínuo as descargas passam a se concentrar em torno de um determinado ângulo, sendo este efeito mais pronunciado para vazios com maior diâmetro. Este fato foi confirmado quantitativamente pelo parâmetro assimetria. Ainda, quanto maior o diâmetro do vazio maior a carga aparente transferida durante a atividade de descargas parciais e maior a assimetria das distribuições. Nas medidas com raios-X, contínuo e pulsado, foi encontrado que para as amostras de epóxi a faixa de maior probabilidade de descargas independe do diâmetro do vazio, enquanto para as amostras de polietileno esta faixa diminui com o aumento do diâmetro do vazio.

As distribuições obtidas para o polietileno não são tão bem comportadas quanto as obtidas para o epóxi devido à ação das descargas neste primeiro. O polietileno, quando sob ação de descargas, oxida rapidamente, levando assim as diferenças observadas entre os diferentes materiais testados.

Para continuidade dos trabalhos referentes a descargas parciais estimuladas com raios-X é sugerido:

- desenvolvimento de um modelo quantitativo que possa correlacionar carga aparente, ângulo de fase e número de ocorrências com tamanho do vazio e intensidade de raios-X;
- aplicar técnicas de simulação para estudo do fenômeno;
- aplicar a técnica em equipamentos elétricos, tais como isoladores, cabos e transformadores.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGORIS, D. P; HATZIARGYRIOU, N. D. Approach to Partial Discharge Development in Closely Coupled Cavities Embedded in Solid Dielectrics by the Lumped Capacitance Model. **IEE Proceedings-A**, v. 140, n. 2, p. 131-134, March 1993.

AHMED, N.H.; SRINIVAS, N.N. On-line Partial Discharge Detection in Cables. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 2, p. 181-187, April 1998.

BAGHURST, A.H. A New Method for the Location of Partial Discharges sites Using Modulated X-rays. **IEEE CEIDP**, p. 471, 1985.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation**, ASTM STP669, v. 1, chapters 1-2, Philadelphia, 1979.

BARTNIKAS, R. A Commentary on PD Measurement and Detection. **IEEE TEI**, v. 22, n. 5, p. 629-653, Oct. 1987.

BARTNIKAS, R; NOVAK, J. P. On the Character of Different Forms of Partial Discharge and Their Related Terminologies. **IEEE TEI**, v. 28, n. 6, p. 956-968, Dec. 1993.

BARTNIKAS, R. Partial Discharges: Their Mechanism, Detection and Measurement. **IEEE TDEI**, v. 9, n. 5, p. 763-808, Oct. 2002.

BERTHELOT, J.M. **Matériaux Composites**. 3^a ed., TEC&DOC, 1999.

BOGGS, S. A. Partial Discharge – Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics. **IEEE EIM**, v. 6, n. 6, p. 11-20, Nov./Dec. 1990.

BORSI, H. Digital Location of Partial Discharges in HV Cables. **IEEE TEI**, v. 27, n. 1, p. 28-36, Feb.1992.

BORSI, H. A PD Measuring and Evaluation System Based on Digital Signal Processing. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 21-29, Feb. 2000.

BOZZO, R. et al. Stochastic Analysis of Partial Discharge Patterns Deriving from Electrical Tree Measurements. **5th ICSD**, p. 381-385, 1995.

BOZZO, R. et al. Aging Diagnosis of Insulation Systems by PD Measurements. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 1, p.118, Feb. 1998.

BRAUN, J. M.; RIZZETTO, S.; FUJIMOTO, N. Modulation of Partial Discharge Activity in GIS Insulators by X-ray. **IEEE EIM**, v. 26, n. 3, p. 460-468, June 1991.

BROSCHE, T et al. Novel Characterization of PD Signals by Real-time Measurement of Pulse Parameters. **IEEE TDEI**, v. 6, n. 1, p. 51-59, Feb. 1999.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. 3 ed. New York: Wiley & Sons, 1994.

CHAMPION, J. V.; DODD, S. J. Systematic and Reproducible Partial Discharge Patterns in an Epoxy Resin. **5th ICSD**, p. 339-343, 1995.

CHENG, Y.; XIE, H. A Physical Model for Nanosecond Partial Discharge. **6th ICPADM**, p. 697-700, Xi'an-China, 2000.

CONTIN, A. et al. Inference of PD in Electrical Insulation by Charge-height Probability Distribution. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 1, p. 110-117, Feb. 1998.

CONTIN, A., MONTANARI, G.C., FERRARO, C. PD Source Recognition by Weibull Processing of Charge-height Probability Distributions. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 48-58, Feb. 2000.

CULLITY, B. D. **Elements of X-Ray Diffraction**. London: Addison-Wesley, 1978.

DEVINS, J. C. The Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics. **IEEE TEI**, v. EI-19, n. 5, p. 475-495, Oct. 1984.

DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. **Electrical Degradation and Breakdown in Polymers**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1992.

EDIN, H. **Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage**. Stockholm-Sweden, 2001. PhD Thesis in Electrical Engineering, Kungl Tekniska Hogskolan.

FELDMAN, D.; BARBALATA, A. **Synthetic Polymers – Technology, Properties and Applications**. 1.ed. London: Chapman&Hall, 1996.

FRUTH, B.; NIEMEYER, L. The Importance of Statistical Characteristics of Partial Discharge Data. **IEEE TEI**, v. 27, n. 1, p. 60-65, Feb. 1992

FUHR, J. et al. Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers. **IEEE TEI**, v. 28, n. 6, p. 1057-1067, Dec. 1993.

FUJIMOTO, N.; RIZZETTO, S.; BRAUN, J. M. Improved PD Testing of Solid Dielectrics using X-ray Induced Discharge Initiation. **IEEE EIM**, v. 8, n. 6, p. 33-41, Nov./Dec.1992.

GAFVERT, U.; EDIN, H.; FORSSSEN, C. Modelling of Partial Discharge Spectra Measured with Variable Applied Frequency. **7th ICPADM**, p. 839-842, 2003.

GAMEZ-GARCIA, M.; BARTNIKAS, R.; WERTHEIMER, M.R. Synthesis Reactions Involving XLPE Subjected to Partial Discharges. **IEEE TEI**, v. EI-22, p. 199-205, 1987.

GAXIOLA, E. H. R.; WETZER, J. M. Partial Discharge Modelling and Measurements on Micrometer Voids in Solid Dielectrics. **7th ICDMMA**, 1996.

GJAERDE, A. C. Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. **IEEE EIM**, V. 13, n. 1, p. 6-13, Jan./Feb. 1997.

GULSKI, E.; KREUGER, F.H. Computer Aided Recognition of Discharge Sources. **IEEE TEI**, v. 27, n. 1, p. 469-479, 1992.

GULSKI, E. Computer Aided Measurement of Partial discharges in HV Equipment. **IEEE TEI**, v. 28, n. 6, p. 969-983, Dec. 1993.

GULSKI, E. Digital Analysis of Partial Discharges. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 822-837, Oct. 1995(a).

GULSKI, E. Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 4, p. 630-640, Aug. 1995(b).

GULSKI, E.; KRIVDA, A. Influence of Aging on Classification of PD in HV Components. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 4, p. 676-684, Aug. 1995(c).

GUTFLEISCH, F.; NIEMEYER, L. Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 729-743, Oct. 1995.

HALL, C. **Polymer Materials**. London: Macmillan Education, 1989.

HOWATSON, A. M. **Descargas Eléctricas em Gases**. Ed. Urmo, 1970.

HUANG, X. et al. Partial Discharge Phenomena with X-ray Irradiation. **6th ICPADM**, p. 733-736, Xi'an-China, 2000.

HUDON, C.; REHDER, R. H. Recognition of Phase Resolved Partial Discharge Patterns for Internal Discharges and External Corona Activity. **5th ICSD**, p. 386-392, 1995.

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html>, acesso em 11/2004.

IEC 270. Partial Discharge Measurements, 1981.

JAMES, R. E.; PHUNG, F. H. Development of Computer-based Measurements and their Application to PD Pattern Analysis. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 838, Oct. 1995.

KELEN, A.; DANIKAS, M. G. Evidence and Presumption in PD Diagnostic. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 780-795, Oct. 1995.

KIM, C. S.; MIZUTANI, T. Change in PD Pulse Shape with Ageing. **IEEE TDEI**, v. 11, n. 1, p. 13-18, 2004.

KIM, Y. J.; NELSON, J. K. Assessment of Deterioration in Epoxy/Mica Machine Insulation. **IEEE TEI**, v. 27, n. 5, p. 1026-1039, Oct. 1992.

KRANZ, H.G. Diagnosis of Partial Discharge Signals Using Neural Networks and Minimum Distance Classification. **IEEE TEI**, v. 28, n. 6, p. 1016-1024, Dec. 1993.

KRANZ, H.G. Fundamentals in Computer Aid PD Processing, PD Pattern Recognition and Automated Diagnosis in GIS. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 12-20, Feb. 2000.

KREUGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. 1.ed. London: Butterworths, 1989.

KREUGER, F.H., GULSKI, E., KRIVDA, A. Classification of Partial Discharge. **IEEE TEI**, v. 28, n. 6, p. 917-931, Dec. 1993.

KRIVDA, A. Automated Recognition of Partial Discharge. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 796-821, Oct. 1995(a).

KRIVDA, A. et al. The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns. **IEEE TDEI**, v.2, n. 5, p.889-892, Oct. 1995(b).

KU, C. C.; LIEPENS, R. **Electrical Properties of Polymers – Chemical Principles**. New York: Hanser, 1987.

LALITHA, E. M.; SATISH, L. Fractal Image Compression for Classification of PD Sources. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 4, p. 550-557, Aug. 1998.

LALITHA, E. M., SATISH, L. Wavelet Analysis for Clarification of Multi-Source PD Patterns. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 40-49, Feb. 2000.

LIN, G. et alli. X-ray Induced Phenomena in Cavities and Transformer Oil. **ISH**, paper 3.364.P4, Aug. 1999.

MARTINS, G. A. **Estatística Geral e Aplicada**. 2^a ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MASANORI, M. et al. Study on Application of Wavelet Analisis for Degradation Diagnosis of Partial Discharge in a Void. **5th ICSD**, p. 371-375, 1995.

MASON, H. M. Enhancing the Significance of PD Measurements. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995.

MEIJER, S.; GULSKI, E.; SMIT, J.J. Pattern Analysis of Partial Discharges in SF₆ GIS. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 6, p. 830-842, Dec. 1998.

McALLISTER, I.W. Partial Discharge in Spheroidal Voids – Void Orientation. **IEEE TDEI**, v. 4, n. 4, p. 456-461, Aug. 1997.

MONTANARI, G. C. Aging and Life Models for Insulation Systems Based on PD Detection. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 4, p. 667-673, Aug. 1995.

MONTANARI, G.C.; CONTIN, A.; CAVALLINI, A. Random Sampling and Data Processing for PD-Pulse Height and Shape Analysis. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 30-39, Feb. 2000.

MORSHUIS, P. H. F. **Partial Discharge Mechanisms**. Netherlands, 1993. PhD Thesis in Electrical Engineering. Delft University.

MORSHUIS, P. H. F. Assessment of Dielectric Degradation by Ultrawide-band PD Detection . **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 744-760, Oct. 1995.

NASSER, E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. 1.ed. London: John Wiley & Sons, 1971.

NBR 6940. Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Medição de descargas parciais. Nov. 1981.

NIEMEYER, L.; FRUTH, B.; GUTFLEISCH, F. Simulation of Partial Discharge in Insulation Systems. **7th ISH**, paper 71.05, p. 25-28, Dresden-Netherlands, 1991.

NIKOLAY, P. K. et al. Development of Partial Discharge Model, Simulation and Measurement. **CEIDP**, p. 214-217, 1999.

OKAMOTO, T.; TANAKA, T. Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement Systems. **IEEE TEI**, EI-21, n. 6, p. 1015-1020, Dec. 1986.

OKAMOTO, T.; TANAKA, T. Auto-correlation Function of PD Pulses under Electrical Treeing Degradation. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 5, p. 857-865, Oct. 1995.

OSVATH, P. Comment and Discussion on Digital Processing of PD Pulses. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 4, p. 685, Aug. 1995.

PEDERSEN, A., CRICHTON, G.C.; McALLISTER, I. W. The Theory and Measurement of Partial Discharge Transients. **IEEE TEI**, v. 26, n. 3, p. 487-497, June 1991.

PRITCHARD, L.S.; GRAHAM, H.M.; RYAN, H.M. Evaluation of X-ray Induced Partial Discharge Technique for Epoxy Resin Insulation Systems. **7th ICDMMA**, p. 271-276, 23-26 Sept, 1996.

RIZZETTO, S.; STONE, G.C.; BOGGS, S. A. The Influence of X-rays on Partial Discharges in Voids. **IEEE CEIDP**, p.89-94, 1987.

SILVA, G.C.; SWINKA-FILHO, V.; ROBERT, R. Study of Continuous and Pulsed X-Ray Induced Partial Discharge Statistical Behaviour in Epoxy Samples. **7th ICPADM**, p. 831-834, Nagoya-Japan, June 1-5, 2003.

STONE, G. C. et al. Practical Implementation of Ultrawideband Partial Discharge Detectors. **IEEE TEI**, v. 27, n.1, p. 70-81, Feb. 1992.

STONE, G. C. The Statistics of Aging Models and Practical Reality. **IEEE TEI**, v. 28, n. 5, p. 716-728, Oct. 1993.

STONE, G.C.; GOODEVE, T.E.; SEDDING, H.G. Unusual Partial Discharge Pulse Phase Distributions in Operating Rotating Machines. **IEEE TDEI**, v. 2, n. 4, p. 567-577, 1995.

SWINKA-FILHO, V. **Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios-X pulsado em materiais dielétricos poliméricos**. Curitiba, 2000. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná.

SWINKA-FILHO, V.; ROBERT, R. Imaging of Voids in Dielectric Material by Induced Partial Discharge. **Review of Scientific Instruments**, v. 73, n. 3, p. 1288-92, March 2002.

TANAKA, T. Internal Partial Discharge and Material Degradation. **IEEE TEI**, v. EI-21, p. 899-905, 1986.

TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; DI PRINZIO, R. **Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos**, CNEN, 1998.

THOMSON, J. J., THOMSON, G. P. **Conduction of Electricity Through Gases**, vol. II, 1. ed., New York: Dover Publications Inc., 1969.

TSURU, S., NAKAMURA, M., MINE, T. et al. PD Characteristics and Mechanisms in Artificial Air-Filled Voids at Room and Liquid Nitrogen Temperatures. **IEEE TDEI**, v. 6, n. 1, p. 43-?, 1999.

WANG, Z. et al. PD Monitor System for Power Generators. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 6, p. 850-856, Dec. 1998.

WU, X.; XIE, H.; WU, S. Application of Wavelet Analysis for Detection of Defects in Insulation Systems. **5th ICSD**, p. 229-233, 1995.

ZHENYUAN, W. et alli. PD Monitor System for Power Generators. **IEEE TDEI**, v. 5, n. 6, p. 850-856, Dec. 1998.

ZONDERVAN, J.P.; GULSKI, E.; SMIT, J.J. Fundamental Aspects of PD Patterns of On-line Measurements on Turbogenerators. **IEEE TDEI**, v. 7, n. 1, p. 59-70, Feb. 2000.